

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole National Supérieur des Sciences de la Mer et de l'Aménagement
du Littoral



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME D'INGÉNIEUR EN SCIENCES DE LA MER

Spécialité : AMÉNAGEMENT DU LITTORAL

Sujet :

**Etude et évaluation de l'état de la vulnérabilité du système
côtier de la zone Est-algéroise**

Présenté par :

BENGOUFA Soumia

Soutenu le 12/07/2016 devant le jury suivant :

Mme.BACHARI F.	Professeur	(ENSSMAL)	Présidente
Mr. BELKESSA R.	Professeur	(ENSSMAL)	Promoteur
Mr.OTMANI.H	Maître assistant	(ENSSMAL)	Co- Promoteur
Mr. BACHOUCHE	Maitre assistant	CNRDPA	Examineur

Promotion : 2016

Remerciement

Au terme de ce travail, je remercie, le tout puissant pour m'avoir donné la patience, le courage et surtout la volonté, pour le réaliser.

Je remercie, Monsieur BELKESSA, R, professeur à l'ENSSMAL pour son encadrement de mon projet de fin d'étude

Je remercie Mme. BACHARI, HOUMA, F. professeur et directrice des études à l'ENSSMAL de m'avoir honoré en présidant le jury.

Mr. BACHOUCHE maitre assistant et cadre au CNRDA, d'avoir accepté de consacrer leurs temps et examiner mon travail.

Je tiens tout particulièrement à remercier M. OTMANI, H. pour la chance qu'il ma donner en travaillant avec lui, pour son soutien et patience, et pour ces précieuses conseils et orientations.

Je voudrais adresser toute ma gratitude et remercier Mme. MOUHOUBI, N.I., chercheure et cadre au laboratoire des études maritimes pour ses orientations et sa disponibilité.

Je tiens à exprimer toute mes reconnaissances à Mme. ABBAD, K, qui par ces paroles, ces écrits, et ces remarques a guidé mes réflexions un merci ne suffira jamais pour le temps, la disponibilité complète, qu'elle m'a accordé.

Un grand merci à l'équipe de l'APPL, tout particulièrement à mon tuteur de stage, Mr. DJERARI, N.

Je tiens à exprimer mes reconnaissances à tous mes enseignants, depuis la première année primaire, jusqu'à la cinquième année universitaire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui aucune dédicace ne saurait témoigner de ma gratitude, à mon cher Papa, mon exemple, la source de ma volonté et ma force, rien que pour lui que j'ai pu tenir le coup, à ma précieuse Maman, mon idole, qui me témoigne en toute circonstance un soutien et une force motrice,

« Vous avez tout sacrifié pour moi Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Grâce à vous je suis redevable d'une éducation dont je suis vraiment fière, que dieu vous garde pour moi».

A mon unique frère, ma main droite, ma béquille, Mohamed, ainsi qu'à notre petite sœur, Samira, notre joie et enthousiasme.

A ma chère grand-mère, "ma conseillère " ainsi qu'à mon oncle Ahmed A Walid, T. Un merci ne suffira jamais pour la personne qui m'a tant aidé, soutenu, et contribuer dans la réussite de mon travail, « un mot ne pourra pas exprimer ma gratitude, et ma reconnaissance, tu es un génie »

Je dédie le travail au trio : Imene, Katia, et Hossine,

Ainsi qu'à Shara et Nawel « je vous remercie énormément »

A mon très cher ami Nadjeeb, « amigos, je te remercie jamais assez »

A mon binôme durant mon parcours universitaire, Amine. B

A tout mes amis d'enfance en particulier : mes chères Nihal, Isma et Wahiba, ainsi que Karim, Hichem et Lilia.

Aux personnes et amis avec lesquels j'ai partagé tous les moments agréables de ma vie, à l'unique Cyria ainsi que ses parents, à Hanane et Maroua, à Wafa, Brahim, Amine, G. Mohamed, Wassim, à Ania « que dieu te garde, merci beaucoup » ainsi qu'au membre du CEE.

Liste des abréviations

- APPL**: Agence de promotion et de protection du littoral
- BRGM**: Bureau de Recherche Géologique et Minière (France)
- CVI (IVC)** : Indice de Vulnérabilité Côtière
- DGPS** : Differential Global Positioning System
- DHI**: InstitutHydrauliqueDanois
- DSAS**: Digital Shoreline Analysis System
- GPS** ; Global Positioning System
- HD** : (Hydrodynamic model) module d'hydrodynamisme
- Hs** : Hauteur significatives
- Hs₀**: Hauteur significatives au large
- IGN**: Institut Géographique National (France)
- LCHF** : Laboratoire Centrale d'hydraulique de France
- LEM**: laboratoire des études maritimes
- MNT**: Model Numérique du Terrain
- ONM** : office national de la météorologie
- PPK** : Post ProcessingKinematic
- Q3D** : Quasi-tridimensionnelle
- RTK** : Real Time Kinematic
- SHFN** : Service Hydrographique des Forces Navales. (France)
- SHOM** : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (France)
- SIG** : système d'information géographique
- ST** : (Sand Transport model) module du transport sédimentaire
- SW**: (Spectral Waves model) module des ondes spectrales
- T_p** : Période pique
- USGS** : (United States Geological Survey) Institut d'études géologiques des États-Unis
- WGS 84** : World Geodetic System 1984 (système géodésique mondial révision de 1984)

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude	15
Figure 2: Coupe schématique de l'Atlas Tellien sur le méridien de Thénia	16
Figure 3: Carte géologique de la zone d'étude. Extrait de la carte d'Alger	19
Figure 4: Localisation des plages sableuses dans la zone d'étude	21
Figure 6: Bassin versant et réseau hydrologique de la zone d'étude	23
Figure 5: Réseau hydrographique.....	23
Figure 7: températures moyennes en °C (ONM.2004-2014).	25
Figure 8: Les taux mensuels des précipitations (ONM, 2004-2014).....	25
Figure 9 : Diagramme ombrothermique de Gausse. (ONM, 2004-2014)	26
Figure 10: Roses annuelle et saisonnières des vents au large de la zone d'étude	27
Figure 11: Schéma probable de l'hydrodynamisme dans la zone d'étude	28
Figure 12: Rose annuelle des houles au large de la grande baie de Zémouri.....	30
Figure 13: urbanisation anarchiques (18_05_2016).....	31
Figure 14: Les falaises de Kaf el Arar (16-12-2015).....	32
Figure 15 : Organigramme permettant de définir une méthode de suivi du trait de côte	36
Figure 16 : Aperçus sur les ouvrages de protection implantés dans la zone d'étude	37
Figure 17: Aperçue sur les enjeux exposés dans la zone d'étude (Hôtel, maison...)	37
Figure 18: représentation des différents indicateurs du trait de côte	38
Figure 19: Les deux types de levé DGPS	40
Figure 20: Système complet du DGPS levé RTK base temporaire avec repaire	41
Figure 21: Evolution du trait de côte du secteur Elkadous entre 1959 et 2015	44
Figure 22: Variation du trait de côte du secteur Elkadous dans la période 1959-2016..	44
Figure 23: Evolution du trait de côte, Déca plage-Surcouf-Flots bleu 1959 et 2016.....	45
Figure 24: Variation du trait de côte, Déca plage, Surcouf, Folt Bleus, 1959 et 2016...	45
Figure 25: variation du trait de côte de la plage Tamaris entre 1959 et 2015	46
Figure 26: Variation du trait de côte, Zerzouria entre 1959 et 2015	46
Figure 27: variation du trait de côte dans la zone d'étude entre 1959 et 2016.....	47
Figure 28: représentation de la propagation des houles du secteur N60°	53
Figure 29: Présentation de la propagation des houles du secteur N316°	54
Figure 30: Représentation de la propagation des houles du secteur N360°	54
Figure 31: Représentation de la propagation des houles du secteur N45°	54
Figure 32: Représentation du champ du courant induit par les houles de secteur N45°	56
Figure 33: Présentation du transport sédimentaire induit par la houle du secteur N45°	58
Figure 34: Présentation schématique de la méthode de CVI multi-échelle.....	63
Figure 35: Carte topographique de la zone d'étude élaboré par un MNT 1/30000.....	66
Figure 36: Présentation des degrés de vulnérabilité par lié à la géomorphologie	67
Figure 37: Représentation graphique des taux nets de variation du trait de côte	68
Figure 38: représentation des degrés de vulnérabilité lié à la variable trait de côte.....	68
Figure 39: Carte représentative de la dénivellation des pentes (%) dans zone d'étude..	70
Figure 40: Représentation des degrés de vulnérabilité par rapport à la variable pente..	70
Figure 41: Carte de la distribution des vitesses de variation du niveau de la mer.....	71
Figure 42: Représentation du degrés de vulnérabilité lié à élévation de la mer.....	72
Figure 43: Présentation des hauteurs significatives des houles de provenance N45°	73
Figure 44: Représentation des degrés de vulnérabilité lié à la variable marnage.....	74
Figure 45: Présentation du degré de vulnérabilité en de pourcentage du linéaire côtier	76

Liste des figures

Figure 46: Carte de synthèse représentant le CVI physique de la zone Est algéroise....	76
Figure 47: Représentation du degré de vulnérabilité liée à la variable agglomération ..	78
Figure 48: Représentation du degré de vulnérabilité liée à la variable chemin de fer ...	79
Figure 49: Représentation du degré de vulnérabilité liée à la variable réseau routier ...	80
Figure 50: carte d'occupation du sol à partir d'un traitement d'une image satellitaire..	80
Figure 51: Représentation du type d'occupation des sols de la zone d'étude	81
Figure 52: Représentation du degré de vulnérabilité lié à l'occupation du sol.	81
Figure 54: Représentation du degré de vulnérabilité, la variable patrimoine culturel ...	82
Figure 53: Les ruines de la basilique à Tamentfoust.	82
Figure 55: Représentation du degré de la vulnérabilité lié au, statut de protection	83
Figure 56: Représentation du degré de vulnérabilité en terme de linéaire côtier	84
Figure 57: Carte de synthèse du CVI socio-économique de la zone Est-algéroise	85

Liste des tableaux

Tableau 1: Températures mensuelles moyennes (ONM, 2004/2014)	24
Tableau 2 : Fréquence annuelle et saisonnière des houles au large.....	29
Tableau 3: Fréquences des classes de hauteurs significatives dominantes au large.....	30
Tableau 4: Evolution des superficies en (m ²) des plages,	33
Tableau 5: Présentation des données exploitées et leurs sources.	41
Tableau 6: Présentation des variables retenu pour le calcul du CVI physique.....	65
Tableau 7: Présentation des résultats du traitement statistique, du CVI physique.....	75
Tableau 8: Représentation des variables du CVI socio-économique	77
Tableau 9: Population des trois communes dans la zone d'étude	78
Tableau 10: Présentation des résultats du traitement statistique du CVI socio- économique.....	84

Table des matières

Liste des abréviations	I
Liste des figures	II
Liste des tableaux	III
Introduction	12

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

1	Situation géographique.....	15
2	Cadre géologique et géomorphologique	16
2.1	La géologie régionale.....	16
2.2	Les principales formations géologiques	17
2.2.1	Le socle kabyle	17
2.2.2	Les intrusions magmatiques	17
2.2.3	Les formations Mio-Plio-Quaternaire	17
	• 2.2.3.1 Le Miocène.....	17
	• 2.2.3.2 Le Pliocène	17
	• 2.2.3.3 Le Quaternaire.....	18
2.3	Le cadre géomorphologique	20
2.3.1	La morphologie continentale	20
	• 2.3.1.1 Les plages	20
	• 2.3.1.2 Les falaises	21
	• 2.3.1.3 Le plateau.....	21
3	Cadre hydrogéologique et climatique	22
3.1	L'hydrogéologie.....	22
3.2	Paramètres climatologiques	24
3.2.1	Le climat	24
3.2.2	Les températures.....	24
3.2.3	Les précipitations.....	25
3.2.4	Le vent	26
4	Cadre océanographique	28
4.1	La marée	28
4.2	Les courants	28
4.3	Les houles	29
4.3.1	Les directions au large	29

Table des matières

4.3.2	Les hauteurs significatives au large.....	30
5	Cadre général d'évolution de la zone d'étude.....	31
Chapitre II : cinématique du trait de côte (cartographie de l'érosion)		
1	Introduction.....	35
2	Approche méthodologique.....	36
2.2	L'analyse du type de milieu.....	36
2.3	L'identification des indicateurs du trait de côte.....	37
2.4	Les besoins.....	38
2.5	Les méthodes de levé et d'acquisition du trait de côte.....	38
2.5.1	La photographie aérienne.....	38
2.5.2	Les levés DGPS (GPS Différentiel).....	39
2.6	Les outils et les méthodes de traitement.....	42
3	Présentation et interprétation des résultats.....	43
4	Conclusion.....	48
Chapitre III : fonctionnement hydro-sédimentaire (modélisation numérique)		
1	Introduction.....	50
2	Données nécessaire pour la modélisation du fonctionnement hydro-sédimentaire.....	51
2.1	Les données bathymétriques.....	51
2.2	Des données relatives aux conditions météorologiques.....	51
2.3	Les données relatives au niveau de la mer et au marnage.....	52
3	Mise en place du model.....	52
3.1	Emprise du model et maillage utilisé.....	52
3.2	Modèle couplé MIKE21/3 FM.....	52
3.3	Simulation de la propagation de la houle par le module SW.....	53
3.3.1	Configuration du module SW.....	53
3.3.2	Présentation et interprétation des résultats.....	53
3.4	Simulation des champs de courant par le module HD.....	55
3.4.1	Configuration du module HD.....	55
3.4.2	Présentation et interprétation des résultats.....	55
3.5	Modélisation du transport sédimentaire par le modul ST.....	57
3.5.1	Configuration du module ST.....	57

Table des matières

3.5.2	Présentation et interprétation des résultats	57
4	Conclusion.....	59
Chapitre IV : Evaluation de la vulnérabilité (Calcul des indices)		
1	Introduction	61
2	Définitions du concept de la vulnérabilité.....	62
3	L'évaluation de la vulnérabilité.....	62
3.1	Les outils d'évaluation de la vulnérabilité (L'indice de vulnérabilité).....	63
	• L'indice de vulnérabilité côtière (CVI)	63
	• L'indice de vulnérabilité côtière multi-échelle :	63
4	Approche méthodologique du CVI _{physique}	64
4.1	Choix des variables pour le CVI _{physique} et acquisition des données.....	64
5	Calcul d'indice de vulnérabilité côtière CVI _{physique}	74
6	Approche méthodologique du CVI _{socio-économique}	77
6.1	Choix des variables pour le CVI _{socio-économique}	77
7	Calcul de l'indice de vulnérabilité CVI _{socio-économique}	83
8	Conclusion.....	85
	Conclusion générale.....	88
	Références bibliographique	90

Introduction générale

Introduction générale

Les littoraux et les plages sableuses ouvertes aux agitations marines connaissent, actuellement un fort recul et une submersion marine. Plus de 80% des côtes à l'échelle mondiale sont en voie d'amaigrissement (Paskoff, *et al.*, 2007).

Les zones côtières du pourtour méditerranéen sont les plus vulnérables aux submersions marines dû au changement du climat (GIEC, 2007), Depuis des siècles elle est sujette à une pression anthropique, croissante démographie, déchets, exploitation accrue des ressources, tourisme et transport maritime, qui provoquent des dégradations diverses de l'environnement marin, et ont des conséquences directes sur les activités humaines (Pilkey, *et al.*, 2014), l'Algérie le sont d'avantage, soumises à de multiples risques naturels (PNUD), à les quelles s'ajoutent d'autres anthropiques, à savoir que la côte algérienne est l'une des plus peuplées du bassin méditerranéen (PAC.2009), avec environ 40% de la population vivant sur un territoire représentant à peine 1.9% de la superficie du pays, induisant une forte concentration des activités (51% des industries y sont localisées).(PAC, 2004).

Outre, le littoral Est algérois ne fait pas exception à cette tendance, c'est un système vulnérable aux risques d'érosion et de submersion (Bouhamadouche, 1993). Cette zone côtière qui s'étend de, Cap Matifou (Tamentefoust), à l'embouchure de l'oued Réghaia à l'est, est menacée par de nombreux facteurs, naturels et anthropiques, (Bouakline, *et al.*, 2006) surtout après le développement socio-économique et urbanistique très intense que la zone a connu ces dernières années. Cela a provoqué des menaces d'érosion lourdes de conséquences, et une modification du milieu côtier (Bouakline, 2009), à cet effet une compréhension des tendances de la dynamique côtière, et l'évaluation de son état de vulnérabilité devient une problématique face à la complexité des facteurs en jeux. Depuis l'an 2000, une nouvelle politique d'aménagement et de développement durable est mise en œuvre, pour objectif de protéger le littoral algérois qui fait appel à des outils de planifications pertinentes, à savoir, l'évaluation de la vulnérabilité côtière est considérée comme un outil rapide et peu coûteux de planification et de gestion du littoral et qui donne un aperçu sur les secteurs à risque actuels ou future (Plamer *et al.* 2011), c'est un processus interdisciplinaire qui nécessite la combinaison de grande quantité de données sur les divers paramètres contribuant à la vulnérabilité du territoire (Thumerer *et al.*, 2000)

L'évaluation de la vulnérabilité du système côtier Est algérois devient une recommandation afin de donner un outil pertinent pour la gestion, la problématique de notre travail, s'articule autour de la prévision de l'évolution et la dynamique du système

côtier de notre zone d'étude a fin de prévoir l'état de la vulnérabilité liée aux divers facteurs.

Le présent travail constitue une contribution à un thème de recherche orienté vers l'évaluation et la prédiction de la vulnérabilité, d'un système littoral, en vue d'une gestion des risques. Les objectifs principaux du travail, est de réaliser, dans un langage clair, une évaluation permettant de comprendre la dynamique du système côtier Est algérois, et une proposition d'un outil qui offre à l'ensemble des gestionnaires du littoral des éléments de compréhension de la vulnérabilité et cela en suivant des méthodologies pertinentes avec des données récentes, et des techniques de haute résolution pour :

- Effectuer un suivi de l'évolution du trait de côte pour renseigner sur les tendances d'érosion/accrétion.
- Elaborer un model numérique du fonctionnement hydro-sédimentaire, qui illustre à la fois,le régime hydrodynamique qui règne la zone d'étude ainsi que le transit sédimentaire
- Aboutir à un diagnostic de l'état de vulnérabilité de la zone Est algéroise

Pour mener à terme ces objectifs, la démarche et les structurations adoptées s'appuient sur plusieurs approches réparties sur quatre chapitres :

- Chapitre I : correspond à une approche générale, qui permet de placer la côte dans son cadre régional (géologique, et climatique), ceci a permis de comprendre, la mise en place des paysages actuels du site étudié, le contexte hydrodynamique générale dans le cadre océanographique, ainsi que son aspect géomorphologique.
- Chapitre II : se penche sur l'étude des variations historiques de la position de la ligne de rivage, en se basant sur la photogrammétrie, avec une approche pratique, en élaborant des mesures in-situ de haute résolution à l'aide d'un instrument topographique, le DGPS, dans le but de parvenir à l'identification et la description des taux nets d'érosion/accrétion tout le long de cette côte.
- Chapitre III : traite le volet hydrodynamique et le fonctionnement sédimentaire, dans une approche de modélisation numérique, à l'aide d'un logiciel performant de la troisième génération, le « MIKE 21 ».
- Chapitre IV : en exploitant les résultats des autres chapitres, nous évaluons l'état de vulnérabilité de la zone d'étude, liée aux facteurs physiques, en apportant un élément essentiel, qui est l'aspect socio- économique, tout en créant une base de données à l'aide d'un système d'information géographique.

Chapitre I
Généralité sur la
zone d'étude

1 Situation géographique

La zone d'étude constitue la limite ouest de la baie de Zemouri, elle s'étend du cap Matifou ou « El Marsa » à l'ouest jusqu'à l'embouchure de l'oued Réghaia à l'est. Elle est comprise entre les latitudes nord $36^{\circ}46'96''$ et $36^{\circ}48'54''$ et les longitudes $3^{\circ}14'10''$ et $3^{\circ}20'45''$. (fig.1)

Cette bande du littoral est constituée de deux secteurs bien distincts, l'un situé à l'ouest, allant d'El Marsa jusqu'à Ain Chrob, il est caractérisé par des falaises rocheuses vives. L'autre est formé d'un important système sablonneux qui prend naissance à partir de la plage Surcouf, et s'étend sur une longueur d'environ 5 Km, jusqu'à l'extrémité est de Réghaia plage (limite est de la zone d'étude)

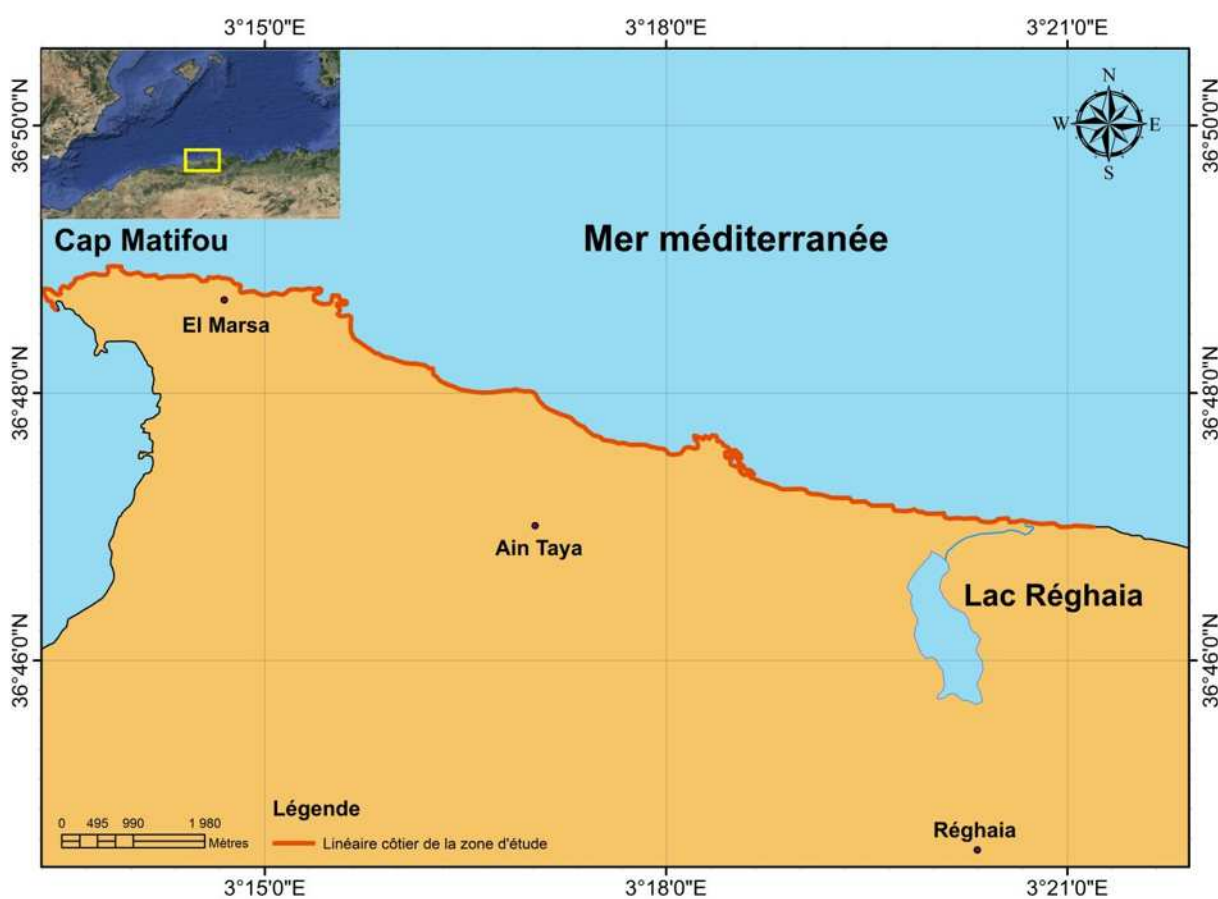


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

2 Cadre géologique et géomorphologique

La connaissance des aspects géologiques et géomorphologiques d'une zone est désormais incontournable, afin de trouver des réponses à des phénomènes d'altération et/ou d'évolution du site, et par conséquent, définir sa sensibilité face aux attaques et aux agressions marines.

2.1 La géologie régionale

La zone d'étude possède les mêmes formations géologiques que celles de la Mitidja. Elle appartient au Tell septentrional, qui fait partie des Magribides. Cette chaîne constitue un segment de l'orogène alpin (Bouhamadouche, 1993)

En nous basant sur une coupe transversale nord-sud réalisée par Caire en 1955 dans le Tell septentrional, deux ensembles structuraux sont mis en évidence (fig. 2) :

- Un domaine interne qui comprend
 - le massif de la grande Kabylie.
 - la couverture Nord kabyle.
 - la dorsale kabyle
- Un domaine externe qui comprend les terrains allochtones c'est-à-dire, les domaines telliens qui reposent sur une formation conglomératique transgressive sur le massif ancien.

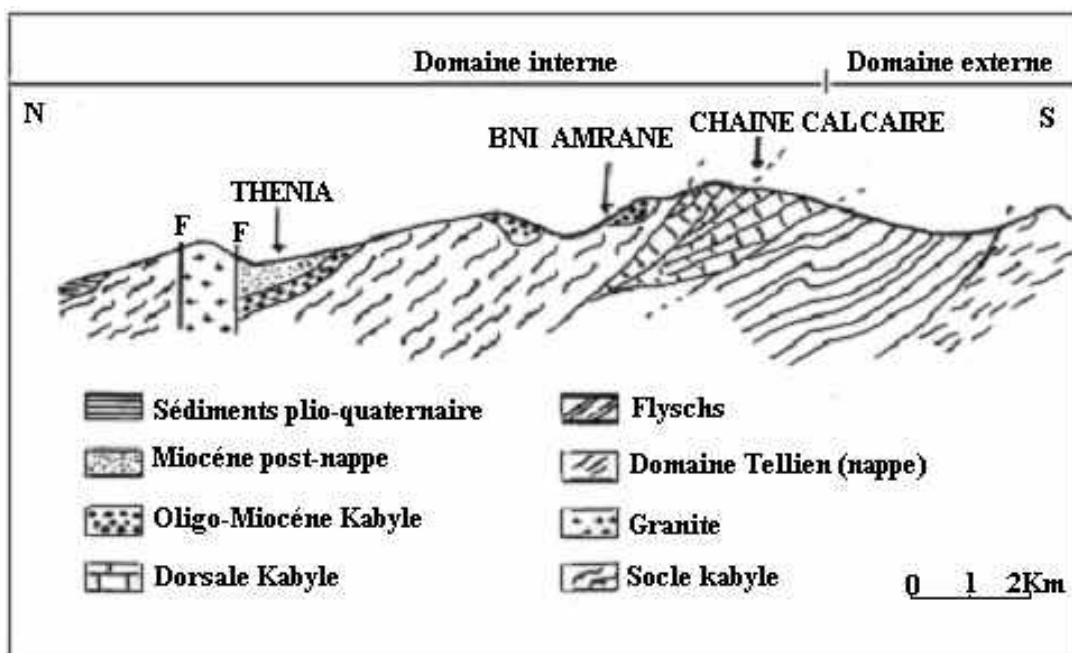


Figure 2: Coupe schématique de l'Atlas Tellien sur le méridien de Thénia (Caire, 1955)

2.2 Les principales formations géologiques

2.2.1 Le socle kabyle

Ce socle, situé à l'extrémité ouest de notre zone d'étude constitue les massifs anciens et forme les pointes du cap Matifou. Il est formé de terrains métamorphiques, composés principalement de schistes et de micaschistes.

La surrection de ce massif est due soit aux mouvements de soulèvement épirogéniques ou à des effets eustatiques. (Bouakline, 2006)

2.2.2 Les intrusions magmatiques

Se rencontrent au cap Matifou, elles englobent les andésites quartzitiques du Burdigalien et le socle rhyolithique du Vindobonien qui affleurent au niveau de Ain Taya.

2.2.3 Les formations Mio-Plio-Quaternaire

2.2.3.1 Le Miocène

- **Burdigalien**

Ce sont des formations de dépôts qui reposent sur le socle cristallophyllien. Ils sont formés de faciès argileux et des éléments conglomératiques pris dans une matrice gréseuse.

- **Vindobonien**

Il est constitué de terrains marno-argileux et marnocalcaires, ces formations sont abondantes sur le long des falaises à l'ouest de la zone d'étude. (fig.3)

2.2.3.2 Le Pliocène

En Algérie, le Pliocène est subdivisé selon deux faciès successifs (Bouhamadouche, 1993)

- **Le Plaisancien**

Cette formation affleure sur les rives de oued Réghaia et au niveau de la plage de Ain Taya.

- **L'Astien**

Présent au niveau des falaises d'AinTaya, ce sont des formations de grés carbonatés.

2.2.3.3 Le Quaternaire

Cette formation est très abondante, les dépôts de Quaternaires sont représentés par des sédiments marins alluviaux et éoliens, des sables grossiers et des grés caillouteux. (Bouakline, 2006)

- **Les dépôts de plage**

Le rivage est formé de plages sableuses, contenant des dépôts marins et du sable rubéfié qui peuvent provenir des falaises ou d'autres reliefs continentaux.

Ces dépôts sont aussi caractérisés par d'anciennes accumulations qui affleurent aux pieds des falaises.

- **Les sables rouges**

Ce sont des sables limoneux et rubéfiés, qui constituent des terrasses marines élevées et étendues. Ils se distinguent par des alluvions plus anciennes et par leur grande homogénéité.

- **Les alluvions récentes**

Elles sont distribuées le long de l'oued Réghaia et sont composées essentiellement de sables et de graviers. (fig.3)

- **Les alluvions anciennes**

La distribution de ces alluvions est quasiment absente dans la zone d'étude. (Bouakline, 2006)

Conclusion

Le Quaternaire est la principale formation géologique qui domine le littoral Est algérois, cela révèle que la lithologie de notre zone d'étude est peu résistante, mis à part le massif ancien de cap Matifou qui est formé de terrains métamorphiques du socle Kabyle.

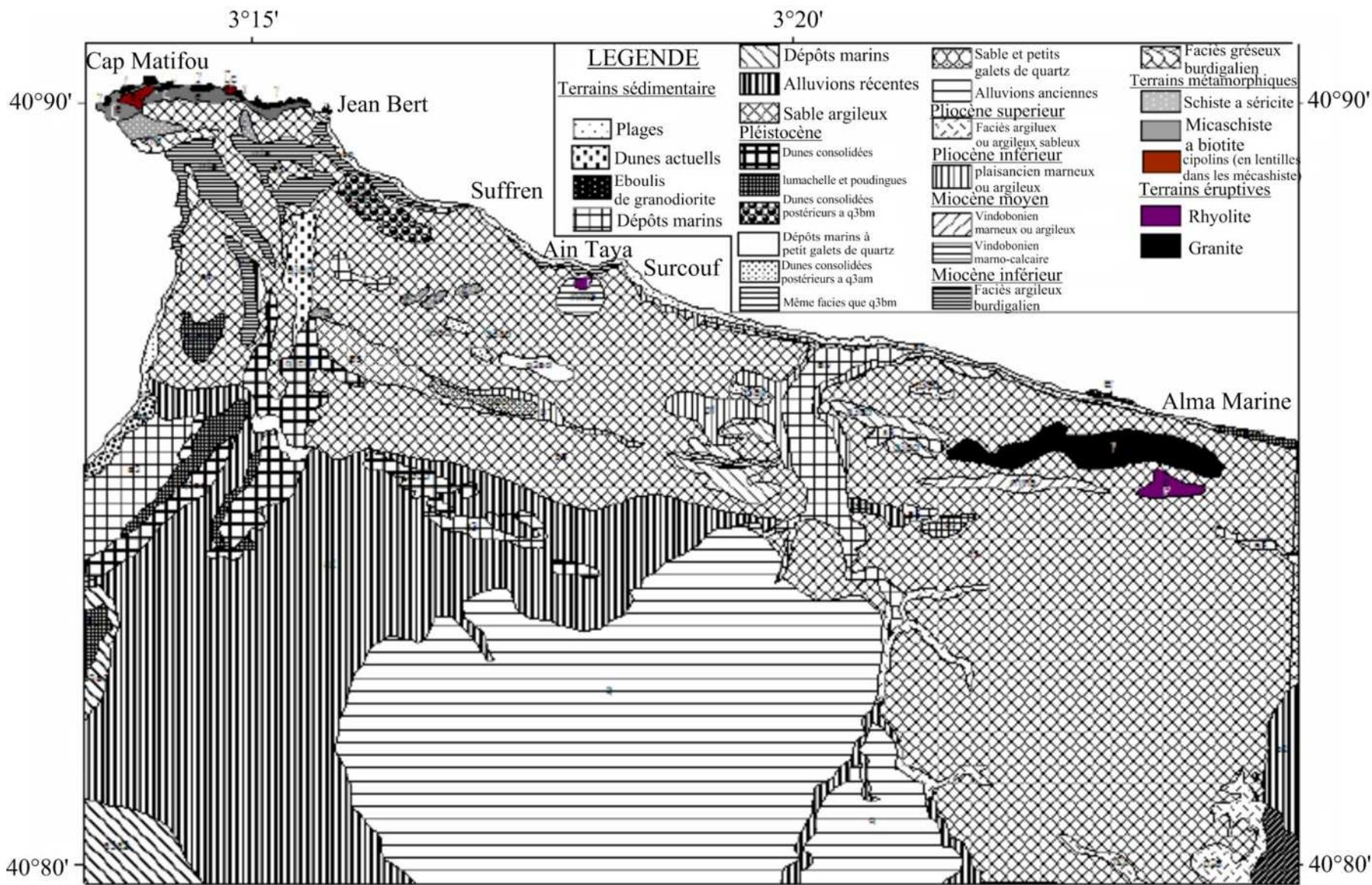


Figure 3: Carte géologique de la zone d'étude. Extrait de la carte d'Alger. (Bouhamadouche, 1993) carte modifiée

2.3 Le cadre géomorphologique

Entre la pointe Tamentfoust (El Marsa) à l'ouest et la limite est de Réghaia, se développent plusieurs systèmes morphologiques, ces derniers sont le produit d'interactions entre plusieurs processus (morphodynamique, géologique...).

2.3.1 La morphologie continentale

2.3.1.1 Les plages

Les plages à dominance sableuses sont presque inexistantes ; elles sont constituées d'alluvions actuelles, mélangées à des débris d'organismes marins et des sables rubéfiés provenant des reliefs environnants (les falaises et les oueds).

Le long de notre zone d'étude, nous pouvons distinguer deux types de plages :

- **Les criques sableuses**

Abondantes surtout au niveau du cap Matifou (de Tamentfoust à Jean Bart), elles se caractérisent par des longueurs de quelques dizaines de mètre et des largeurs étroites.

Ces criques se développent devant des falaises entaillées dans des roches du socle kabyle, elles sont formées de sables, graviers Bryozoaires et coquilles de Lamellibranche. On y trouve aussi des radioles d'oursins et de quelques Foraminifères (Bouhamadouche, 1993)

- **Le système sablonneux**

Sur une longueur d'environ 5km, allant de la plage Surcouf jusqu'à la limite est de Réghaia plage, nous pouvons subdiviser la zone en sites distincts, selon leurs aspects topographiques, morphodynamiques et morphologiques. (fig.4)

- **Le site de Réghaia**

Caractérisé par une plage étroite dans sa partie est et large en se dirigeant vers l'embouchure de l'oued Réghaia. D'une direction NO-SE, et d'une longueur de 1500m, la pente de cette plage, ne dépassant pas les 3°, est qualifiée de faible voire insensible.

- **Le site d'ElKadous**

Une plage parmi les plus grandes de la zone d'étude, avec une longueur de 4.5 km et une largeur qui atteint les 300m à certains endroits. Elle constitue un grand stock sableux. Les pentes sont faibles ; 3 à 5 %.

- **Le site Surcouf et Déca plage**

Des plages qui s'étendent sur un linéaire de 1300 m environ, d'une orientation NE-SO, la quantité du stockage sédimentaire est très faible.

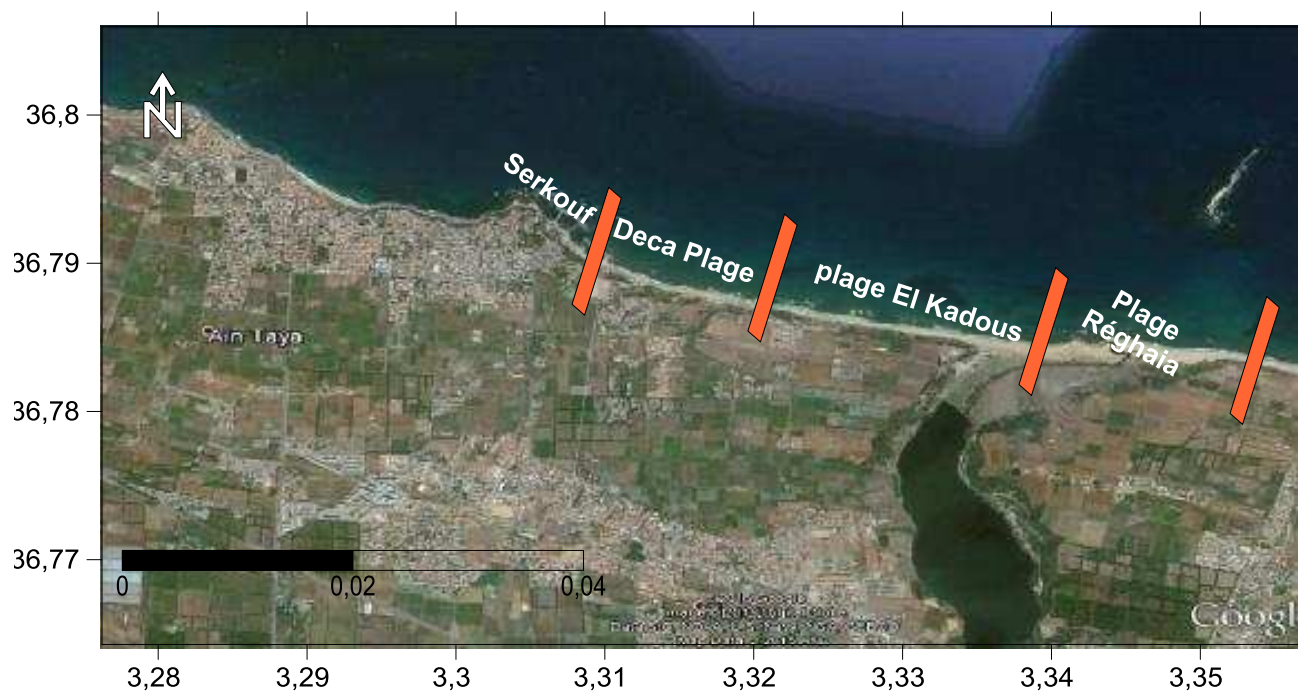


Figure 4: Localisation des plages sableuses dans la zone d'étude (Google Earth, 2015)

2.3.1.2 Les falaises

Le long du littoral Est algérois, les traits géologiques et géomorphologiques laissent apparaître deux types de falaises qui se succèdent :

- **Les falaises entaillées en formation meuble :** A l'est de la ville de Ain Taya à Réghaia plage, se développe une côte meuble constituée de falaises atteignant en moyenne 5 à 35 m de hauteur, entaillées dans des marnes bleues et calcaires du Pliocène inférieur et supérieur.
- **Les falaises entaillées dans des roches dures :** Tout au long de la côte de Tamenfoust (El Marsa), on distingue des falaises qui atteignent en moyen 20 à 40 m de hauteur. Au bas de ces falaises se trouvent de petites criques sableuses. (Bouakline, 2009)

2.3.1.3 Le plateau

Le plateau se situe au sud de la plage. Il est légèrement incliné vers l'ouest sous un aspect évasé. Sa topographie est plus ou moins ondulée, avec des pentes assez faibles et des altitudes qui varient entre 15m et 50m. Il est délimité au Nord par une falaise qui donne sur la mer.

3 Cadre hydrogéologique et climatique

3.1 L'hydrogéologie

La zone fait partie du grand bassin de la Mitidja, cette dernière reçoit les eaux de ruissèlement provenant de l'atlas blidéen auxquelles s'ajoutent les eaux de pluies. La plaine présente deux sous-bassins versant (fig.5) :

- Le sous-bassin versant de l'oued Réghaia
- Le sous-bassin versant de l'oued el Hamiz

Le réseau hydrographique n'a pas d'effets directs sur notre zone d'étude, l'oued le plus proche est oued el Hamiz avec un bassin versant de 160 km², son embouchure se situe près du cap Matifou. La présence du barrage el Hamiz en amont réduit considérablement les apports solides venant en mer (LEM, 2006).

En revanche le cours d'eau le plus important dans notre zone est oued Réghaia, il parcourt la partie orientale de la plaine de la Mitidja, il traverse la ride sahélienne au nord, au contact de laquelle s'est formée le marais de Réghaia pour se heurter en aval à un cordon dunaire qui modifie son trajet vers l'est pour enfin se jeter à la mer.

L'oued principal a une longueur de 20 Km, son bassin versant occupe une superficie de 86 Km², dont 25km² est constituée par un territoire montagneux, le reste est une plaine inclinée vers la mer. Cet oued est lui-même attendant à deux affluents, à savoir oued Guesbai et oued Berraba. (fig.8)

Deux autres oueds secondaires font aussi partie du réseau hydrographique local :

- L'oued el Biar: sa longueur est de 4075 mètres et son bassin versant de 20 km². Cet oued prend naissance aux environs de la zone industrielle Rouiba-Réghaia et traverse en grande partie des champs avant de se déverser au niveau du lac.
- L'oued Boueah : c'est un affluent d'oued el Hamiz qui draine les eaux de ruissellement des terres agricoles de la Mitidja nord-est. La superficie de son bassin versant est de 20km². (Mezhoud, 2011)

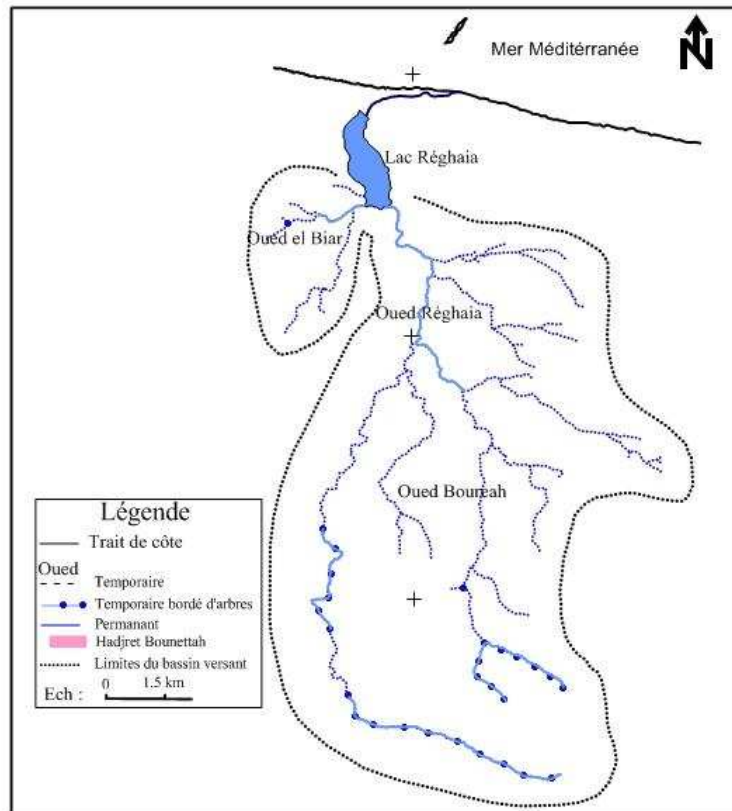


Figure 6: Réseau hydrographique. (Chaalal, 2006) carte modifiée

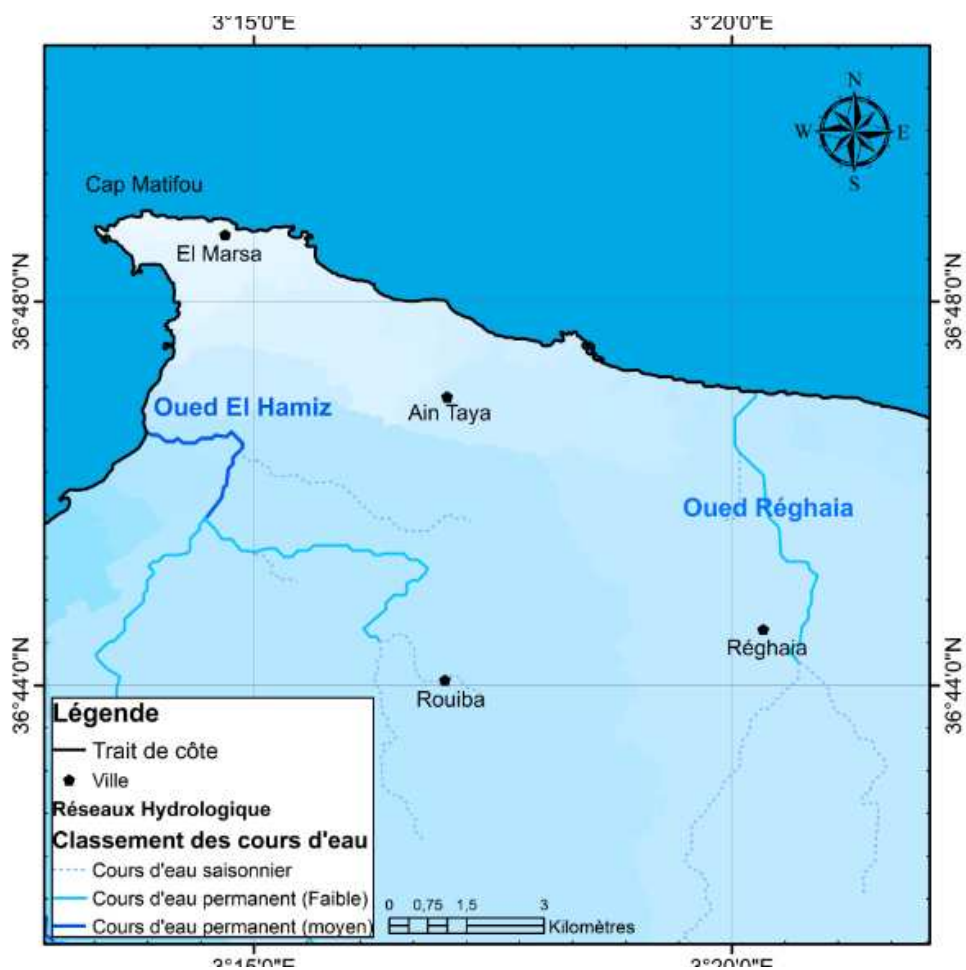


Figure 5: Bassin versant et réseau hydrographique de la zone d'étude

3.2 Paramètres climatologiques

3.2.1 Le climat

Le climat de la région est de type méditerranéen; caractérisé par une saison humide de huit mois avec un hiver tempéré, doux et humides, et une période sèche de quatre mois correspondant à la saison estivale, avec un été chaud et sec.

3.2.2 Les températures

L'analyse des températures moyennes mensuelles relevées par l'ONM entre 2004 et 2014 montre que la saison estivale, qui s'étale du mois de mai au mois d'octobre, est caractérisée par des températures relativement douces dont les moyennes varient entre 19,31°C et 26,40°C.

Pendant la saison hivernale, le mois le plus froid est celui de février avec 10.83°C de température. (fig.7) (tab.1).

Tableau 1: Températures mensuelles moyennes (ONM, 2004/2014)

	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Température moyenne (°C)
Janvier	10,02	19,52	15,54
Février	8,05	16,91	12,38
Mars	9,78	18,69	14,15
Avril	12,40	20,79	16,64
Mai	14,86	23,90	19,31
Juin	18,57	28,12	23,05
Juillet	21,39	30,69	25,78
Août	21,86	31,18	26,40
Septembre	19,99	28,66	24,16
Octobre	16,88	27,00	21,43
Novembre	12,26	21,75	16,57
Décembre	9,26	18,01	13,40

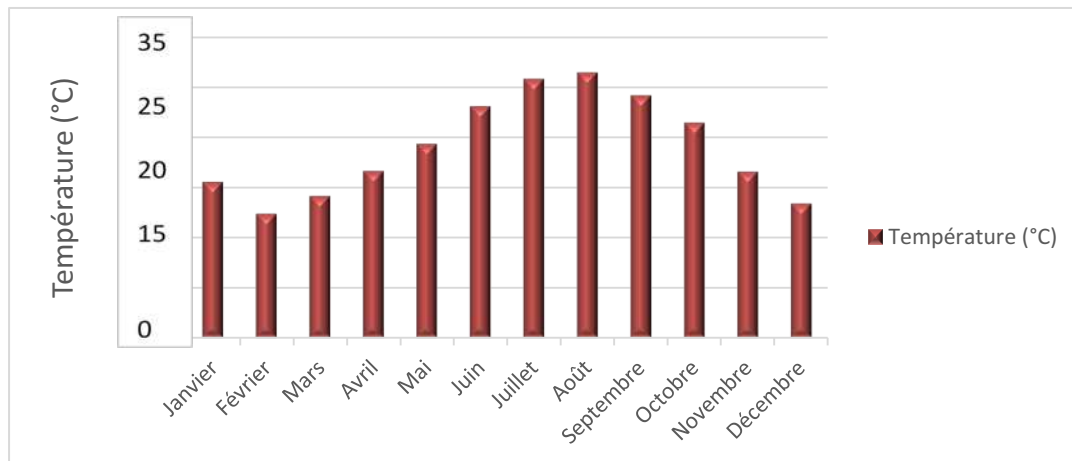


Figure 7: températures moyennes en °C (ONM.2004-2014).

3.2.3 Les précipitations

L'analyse des données de précipitations, enregistrées par l'ONM sur une période de 10 ans allant de 2004 à 2014, nous a permis de réaliser les histogrammes de variations mensuelles du volume des pluies (fig.8)

La période la plus pluvieuse s'étale du mois de Septembre jusqu'au mois de Mai avec une moyenne maximale de 116mm au mois de Décembre, alors que la période d'été est pratiquement sèche. D'après cette figure nous constatons : une augmentation significative de Septembre à Janvier, puis une diminution de Février à Juin.

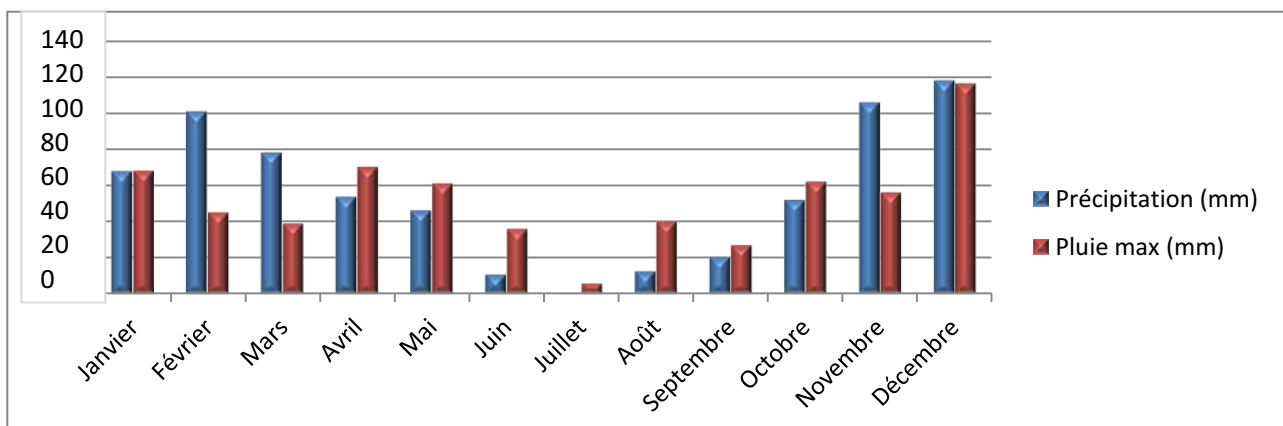


Figure 8: Les taux mensuels des précipitations (ONM, 2004-2014)

3.2.4 Le vent

Le vent est un paramètre d'une grande importance ; c'est un générateur des agitations marines (vagues et courants superficiels). Il joue un rôle dans l'évolution géomorphologique, en agissant sur le transfert sédimentaire.

Pour cela, nous avons exploité les données de la campagne MEDATLAS (1999-2004) présenté sous forme de tableaux contenant les fréquences d'apparition annuelle et saisonnière des vents, calculées à partir de la série de données enregistrée au niveau de la station la plus proche du site d'étude située à 3°E 37°N au large de la Baie d'Alger à 35m de profondeur.

L'analyse statistique des données au large nous a permis de déterminer la fréquence d'apparition du vent par direction à deux échelles ; annuelle et saisonnières d'après le tracer des roses de vents associés (fig.10). Nous distinguons deux régimes dominants :

En période estivale : les vents dominants proviennent des secteurs est à nord-est avec une fréquence d'apparition de 61,61%.

En période hivernale : Les vents dominants proviennent des secteurs ouest à sud-ouest avec une fréquence de 48,04 %.

Conclusion

Le climat de la région est soumis à l'influence du climat méditerranéen de type subhumide, caractérisé par deux saisons distinctes (fig. 9)

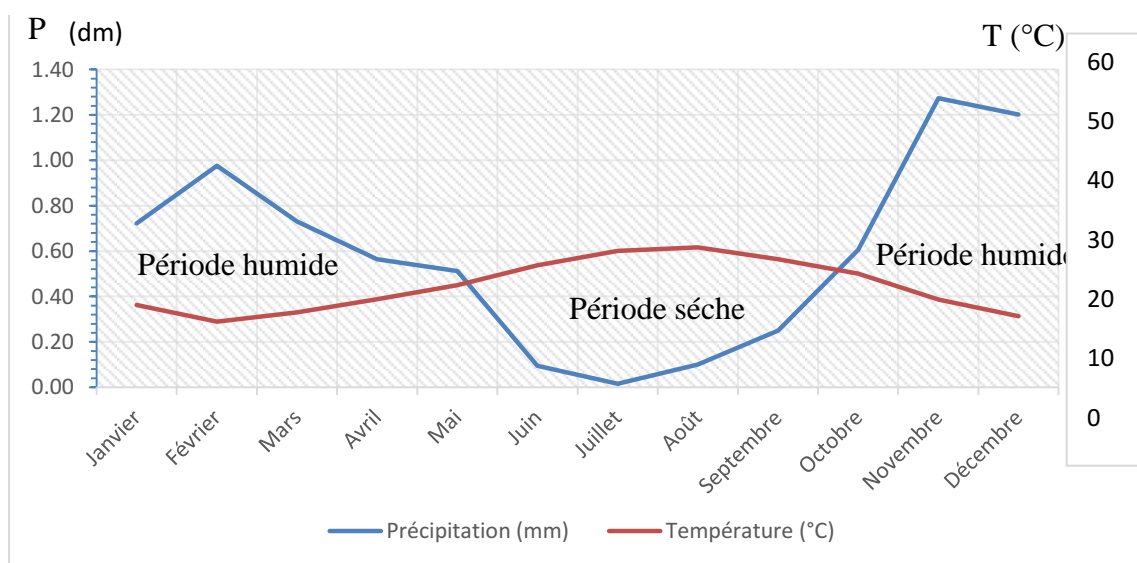


Figure 9 : Diagramme ombrothermique de Gausse. (ONM, 2004-2014)

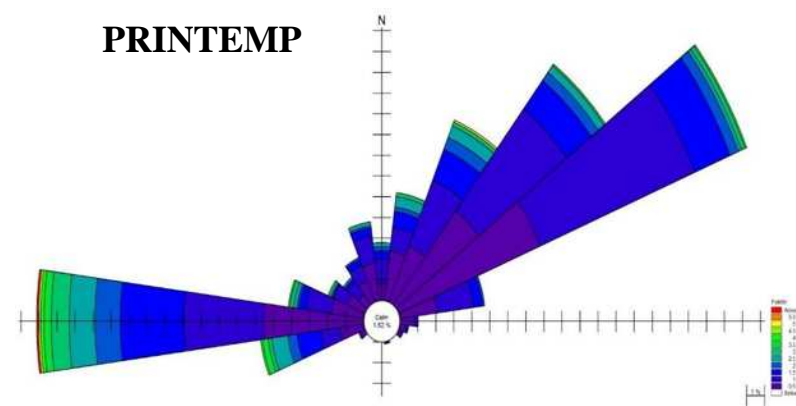
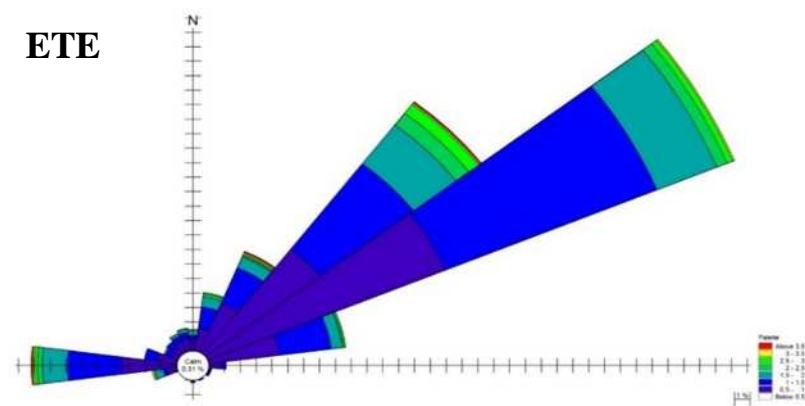
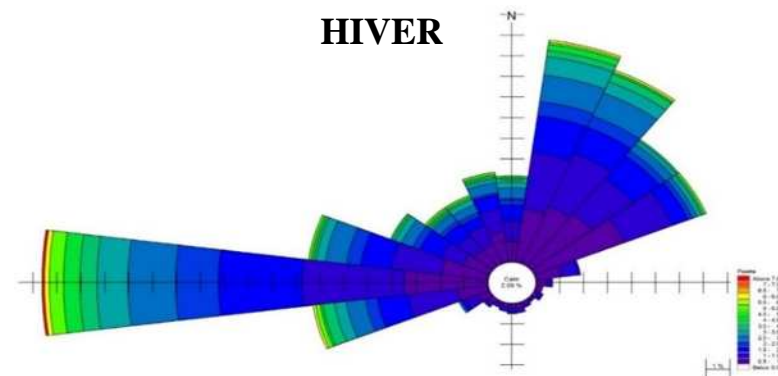
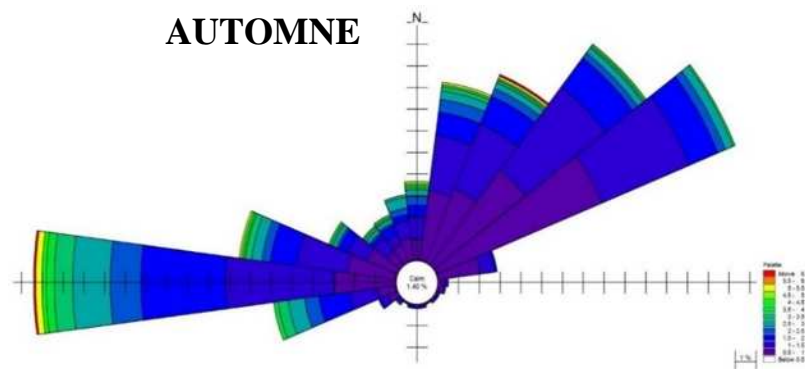


Figure10: Roses annuelle et saisonnières des vents au large de la zone d'étude (MEDATLAS, 1999-2004)

4 Cadre océanographique

Dans le cadre de notre travail, l'étude du facteur hydrodynamique, est primordiale. Néanmoins certains paramètres sont plus importants que d'autres, comme c'est le cas de l'action des houles face l'action des marées.

4.1 La marée

La méditerranée, bénéficie d'une faible amplitude de marée, en particulier sur les côtes algériennes, où elle dépasse rarement 0.35m avec des périodes de 12 à 24 heures.

Bien que le littoral algérien soit de type microtidal, il est recommandé de prendre en considération le marnage, en cas d'étude des risques, notamment pour l'amplification des phénomènes d'inondation, mais pas autant pour l'étude hydrodynamique.

4.2 Les courants

Selon une étude effectuée par LCHF, 1970, les directions des divers courants liées au vent sont comme suit:

- Les vents du nord-est génèrent des courants de direction ouest.
- Les vents du secteur nord et ouest génèrent les courants de direction est.

A partir des constats de cette même étude nous avons réalisé une carte qui représente les directions des courants dans la zone d'étude (fig.11)

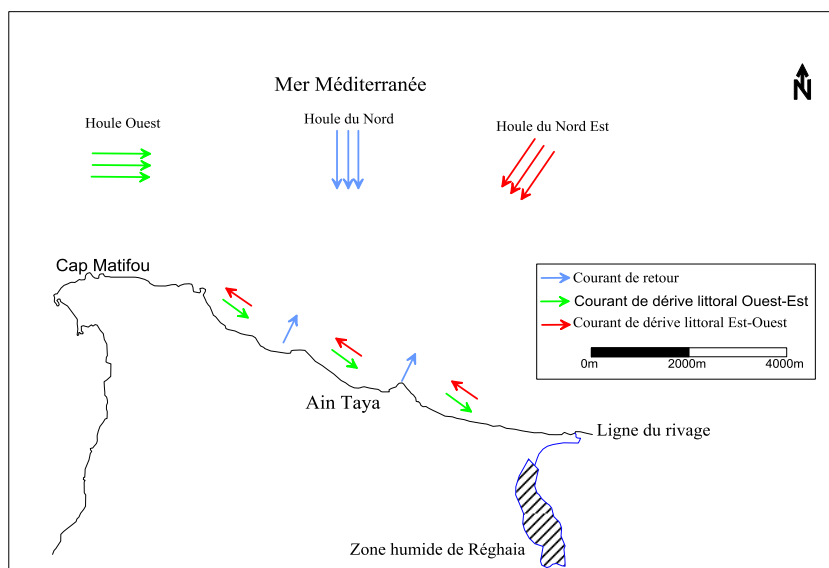


Figure 11: Schéma probable de l'hydrodynamisme dans la zone d'étude décrit selon LCHF 1970

4.3 Les houles

4.3.1 Les directions au large

Le tableau (Tab.2) représente les fréquences d'apparition annuelle et saisonnières des houles par direction.

L'analyse des roses de houle (fig.16) nous a permis de constater que les directions dominantes proviennent des secteurs :

- ouest à 27% du temps annuellement, mais avec une fréquence d'apparition plus importante en hiver (34%) qu'en été (13%)
- nord est à 43% du temps annuellement, mais avec une fréquence d'apparition plus importante en été (66%) qu'en hiver (26%).

En conclusion, les houles en provenance du secteur nord-est prédominent en été. Les houles qui proviennent du secteur ouest prédominent en hiver alors que les houles qui proviennent des deux secteurs nord-est et ouest prédominent durant l'automne, le printemps et annuellement.

Tableau 2 : Fréquence annuelle et saisonnière des houles au large par direction. (MEDATLAS, 1999-2004)

	Annuelle	Hiver	Printemps	Eté	Automne
N ($0^{\circ} \pm 15^{\circ}$)	13,57	19,5	11,93	7,2	15,16
NE ($45^{\circ} \pm 15^{\circ}$)	42,95	25,8	45,09	65,48	37,95
E ($90^{\circ} \pm 15^{\circ}$)	5,47	2,9	6,26	10,02	3,79
SE ($135^{\circ} \pm 15^{\circ}$)	0,4	0,9	0,3	0,3	0,5
S ($180^{\circ} \pm 15^{\circ}$)	0,4	1,4	0,1	0,2	0,6
SW ($225^{\circ} \pm 15^{\circ}$)	0,8	2,2	0,4	0	1,4
W ($270^{\circ}N \pm 15^{\circ}$)	27,3	33,7	28,16	12,92	31,1
NW ($315^{\circ}N \pm 15^{\circ}$)	7,7	11,7	6,28	3,5	8,29

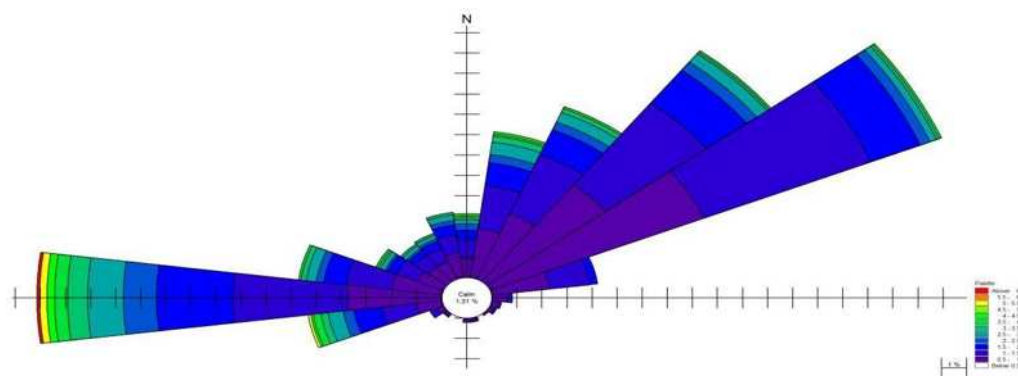


Figure 12: Rose annuelle des houles au large de la grande baie de Zémouri (Source MEDATLAS).

4.3.2 Les hauteurs significatives au large

Les fréquences d'apparition des classes de hauteurs significatives en fonction des directions dominantes sont résumées dans le tableau (Tab.3)

Tableau 3: Fréquences des classes de hauteurs significatives en fonction des directions dominantes au large. (MEDATLAS, 1999-2004)

	Annuelle		Hiver		Printemps		Eté		Automne	
	NE	W	NE	W	NE	W	NE	W	NE	W
0,00 - 0,25	0,8	0,1	1,1	0,4	0,7	0,3	0,2	0	1	0,1
0,25 - 0,5	7,21	2,64	4,3	2,8	6,16	3,54	10,33	1,5	7,64	2,48
0,5 - 0,75	11,47	4,17	6	4	11,02	5,15	18,76	3,91	10,23	3,78
0,75 - 1	9,14	4,27	3,9	4,5	11,12	3,44	14,44	2,81	7,94	4,86
1 - 1,25	6,3	3,55	3,3	4	7,79	3,53	10,03	1,7	4,77	4,27
1,25 - 1,5	3,45	2,95	2,2	3,3	3,74	2,42	5,42	1,6	2,67	3,96
1,5 - 1,75	2,03	2,13	1,3	2,8	1,72	2,83	2,9	0,5	1,9	2,89
1,75 - 2	1,33	2,03	1,1	2,9	1,63	2,02	1,8	0,4	1,1	2,59
2 - 2,5	1,32	2,44	1,8	3,7	1,21	2,52	1,3	0,2	1	3,08
2,5 - 3	0,4	1,31	1	2,2	0,4	1,41	0,3	0,2	0,2	1,69
3 - 3,5	0,3	0,91	0,6	1,3	0,2	0,8	0,2	0,1	0,3	0,7
3,5 - 4	0	0,4	0,1	0,9	0	0,3	0	0	0	0,3
04- 05	0	0,4	0,1	0,9	0,1	0,1	0	0	0,1	0,4
05- 06	0	0,1	0,11	0,3	0	0,1	0	0	0,1	0,1
6 - 7,5	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0

D'après le tableau (Tab.3) le nord-est et l'ouest sont les deux secteurs dont les agitations sont les plus fréquentes.

- Les houles dominantes sont caractérisées par des hauteurs significatives oscillant généralement entre 0.25m et 2.5m
- Les houles de tempêtes sont rares et sont caractérisées par des hauteurs significatives fluctuant généralement entre 3.5 et 7.5m
- Les fortes agitations proviennent de l'ouest avec des hauteurs significatives de houles pouvant atteindre un maximum de 7.5m en hiver, 6m annuellement, au printemps, et en automne et 3.5 en été.

5 Cadre général d'évolution de la zone d'étude

La zone d'étude a subi des transformations notables sur ses côtes, engendrées par une érosion importante, Celle-ci est liée à plusieurs facteurs naturels (action de la mer), et accélérée par des facteurs anthropiques qui se présentent selon deux principales sortes :

- L'occupation du sol et l'urbanisation anarchique,

L'emprise de l'homme sur le littoral se manifeste par des aménagements qui laissent des marques sur le trait de côte, la zone d'étude est caractérisée par une littoralisation importante (fig.13) avec une population conséquente,



Figure 13: urbanisation anarchiques
(18_05_2016)

L'extraction du sable pour la construction, l'assèchement de la zone

humide par le pompage de l'eau pour l'irrigation, l'eutrophisation des eaux et du milieu accentuée par les dépotoirs à déchets solides, provoquent la détérioration de la zone,

- La fréquentation touristique

La nature attractive de notre zone d'étude fait de cette dernière un des sites touristiques qui enregistre les taux de fréquentations les plus élevés au niveau de la wilaya d'Alger, Cela a provoqué une déstabilisation des équilibres naturels des plages,

Ces facteurs d'origines humaines contribuent, parallèlement avec d'autres facteurs naturels, à accentuer le phénomène érosif ; qui est principalement dû aux effets cumulés

des tempêtes, la hausse relative du niveau de la mer (0,2m/100ans) ainsi que les faibles apports de l'oued Réghaia, qui constitue la principale voire la seule source qui alimente les plages en termes de sédiment,

Par conséquent l'érosion côtière de notre zone se matérialise par la déstabilisation des falaises, avec des risques d'affaissement et d'amaigrissement des plages, après une diminution du volume des transits littoraux,

- **Dégradation des falaises de Ain Taya**

Avec des hauteurs qui varient de 11 à 30 m, ces falaises présentent des niveaux durs de micro- conglomérats peu épais qui surmontent les marnes grises du Burdigalien,

Le sommet de ces falaises est constitué d'une formation épaisse de sable argileux rougeâtre (quaternaire récent), Elles sont affectées et soumise à l'action conjuguée de la mer, du ruissellement et de l'infiltration de l'eau en provoquant l'effondrement sur la plage, de ce fait des constructions et des installations s'y présentes sont menacées (risque).



Figure 14: Les falaises de Kaf el Arar (16-12-2015)

- **Des protections en durs**

Plus de 90% de la ligne côtière de AinTaya est aménagée, pour lutter contre le phénomène d'érosion, (Bouakline, 2009) ; Des murs en béton et des digues en enrochement ont été édifiés au niveau des falaises de « Kaf el Arar » Ain Taya, Néanmoins certaines de ces protections ont provoqué des désagréments dus à leur implantation sur le site, Dans le but de protéger les différentes habitations qui sont menacées, des aménagements en forme d'épis en L et en T ont été mis en place

Deux brises-lames ont été réalisés au niveau de la plage Surcouf, à l'ouest de la zone d'étude, dont l'existence a permis la régénération de la plage, en formant un tombolo devant le brise-lame ouest,

- **Un bilan des variations de trait de côte**

Une étude réalisée par Bouakline en 2009, sur la variation de la ligne de côte de la zone Est algéroise, a révélé une irrégularité dans les valeurs de recul du trait de côte entre les profils du centre de la zone d'étude et ceux des extrémités.

Dans cette même étude, le bilan de variation du trait de côte, entre 1959 et 2008, signale une perte de l'ordre de 9500m², 41620m² et 22040m² qui correspondent respectivement aux plages El Kadous, Déca plage, et Surcouf (tab.4), Ces résultats mettent en question la fiabilité des ouvrages de protection mise en place,

Tableau 4: Evolution des superficies en (m²) des plages, Source (Bouakline, 2009)

Année	Plage el kadous	Déca plage	Plage surcouf
1959	244700	88820	36900
1972	257300	74750	22780
2003	186600	46860	12110
2008	149700	47200	14860

Chapitre II

*Cinématique du trait de côte et
cartographie de l'érosion*

1 Introduction

L'érosion du littoral, ainsi que les risques de submersion des côtes, constituent un sujet de préoccupation de plus en plus prégnant pour la zone Est algéroise, compte-tenu de l'augmentation des enjeux dans cette zone, qui est soumise à des aléas naturels récurrents. Il convient, dans un deuxième chapitre, d'analyser l'évolution de la frange côtière afin de prévoir l'état de la vulnérabilité lié à la mobilité de la ligne de rivage à différentes échelles spatio-temporelles et de donner un élément de réponse à la problématique de l'état général de la vulnérabilité de la zone d'étude.

Le présent chapitre se subdivise en trois parties afin d'atteindre l'objectif de traiter et analyser la cinématique du trait de côte dans une échelle de temps de 57 ans, de 1959 jusqu'à l'année actuelle 2016 :

- En premier lieu, la procédure et la méthodologie adoptée pour effectuer ce suivi sont expliquées.
- En second lieu, les résultats des levés et des analyses comparatives des variations du trait de côte sont exposés.
- A la fin une évaluation d'aléa est faite, avec une représentation graphique

Avant tout, une définition d'une notion qui se répète le long de ce chapitre est incontournable, « le trait de côte ». Selon le SHOM et IGN (1992), ce dernier est défini comme étant la ligne d'intersection de la surface topographique avec le niveau des plus hautes mers astronomiques. Pour analyser sa cinématique, une définition du « trait de côte » doit être donnée de manière à prendre en compte les différentes configurations géomorphologiques des littoraux. (Mellet, et al., 2012) . Il convient d'aborder la notion plus générale de frange ou de bande côtière qui s'étend du domaine marin au domaine continental, au sein de laquelle un ou plusieurs indicateurs géomorphologiques sont définis selon les types de côtes. (Elizabeth, et al., 2005)

Le trait de côte doit avoir la qualité de représenter schématiquement mais correctement l'état global du littoral du point de vue de son évolution sédimentaire ; Ce n'est pas une définition théorique du trait côte, généralisable à tous les environnements qu'il convient de se donner, mais une définition « fonctionnelle » de la frange côtière en fonction du type de littoral et des objectifs de suivi. Dans ce cas, on parle plutôt des indicateurs de trait de côte.

2 Approche méthodologique

Le suivi du trait de côte doit s'inscrire dans une logique de progression et d'étapes à entreprendre, afin de garantir au mieux la pertinence des résultats. Pour cela nous avons opté pour une méthodologie proposée par un guide de gestion du trait de côte élaboré par le Bureau de Recherche Géologique et Minière français (BRGM). L'organigramme (fig.15) représente les démarches à suivre.

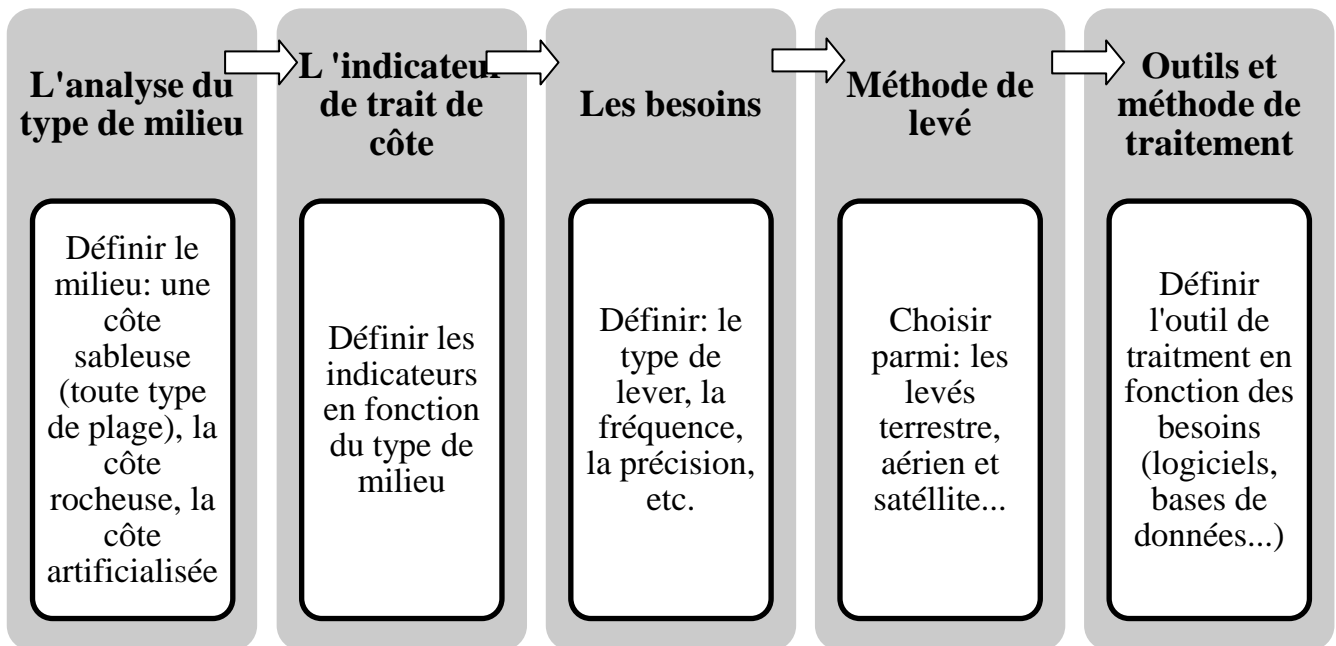
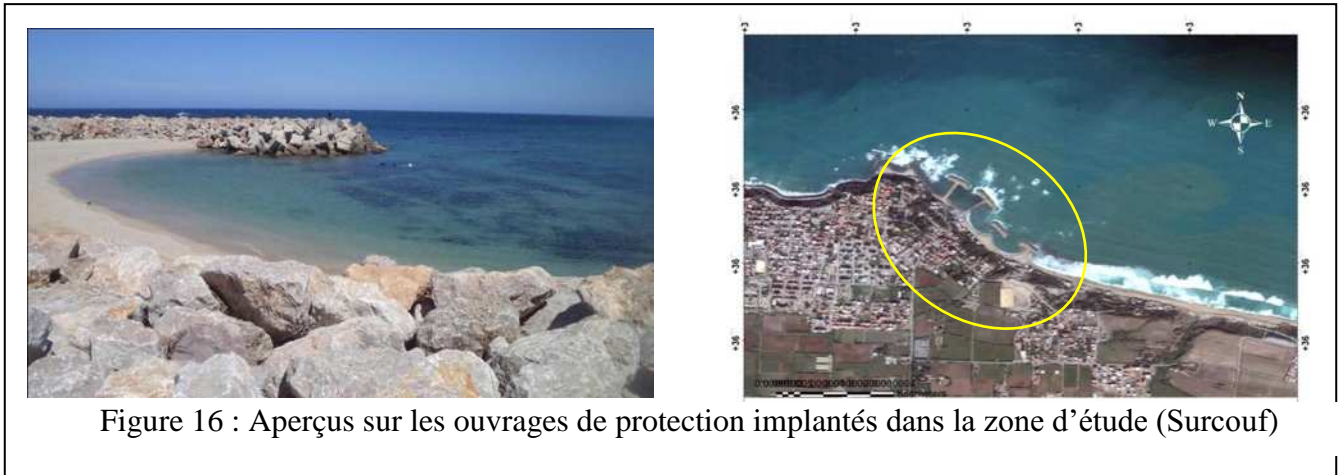


Figure 15 : Organigramme permettant de définir une méthode de suivi du trait de côte (Mellet, *et al.*, 2012)

2.2 L'analyse du type de milieu

La première étape de notre démarche pour l'évaluation de la variation du trait de côte, consiste à analyser le type de milieu littoral. Cette étape vise à caractériser le contexte géographique et géomorphologique de la zone, de manière à acquérir une connaissance globale du secteur étudié et à analyser les différents mécanismes présents (érosion, submersion). Elle permet d'identifier les enjeux exposés (fig.16), et les différents aménagements réalisés à proximité du secteur. L'ensemble de ces données apporte un aperçu du contexte géodynamique global de la zone d'étude.

- La côte étudiée comprend une variété géomorphologique marquante, à savoir les plages et les cordons dunaires, ainsi que les falaises situées entre Réghaia et Ain Taya, prenant en considération la présence d'ouvrages de protection (épis, digues, etc.). (fig.16)
- Il faut noter aussi que la tendance à l'érosion est généralisée sur la totalité de la côte Est algéroise. (Bouakline, 2009).



2.3 L'identification des indicateurs du trait de côte

Divers indicateurs du trait de côte peuvent être préconisés pour notre zone d'étude : le pied de dune, la limite de végétation, la crête de dune, la berme, etc. (fig.18) L'indicateur retenu dans cette étude est la limite supérieure du jet de rive (limite maximale de run_up). Encas de présence d'ouvrages, c'est la limite côté terre de l'ouvrage qui est relevée

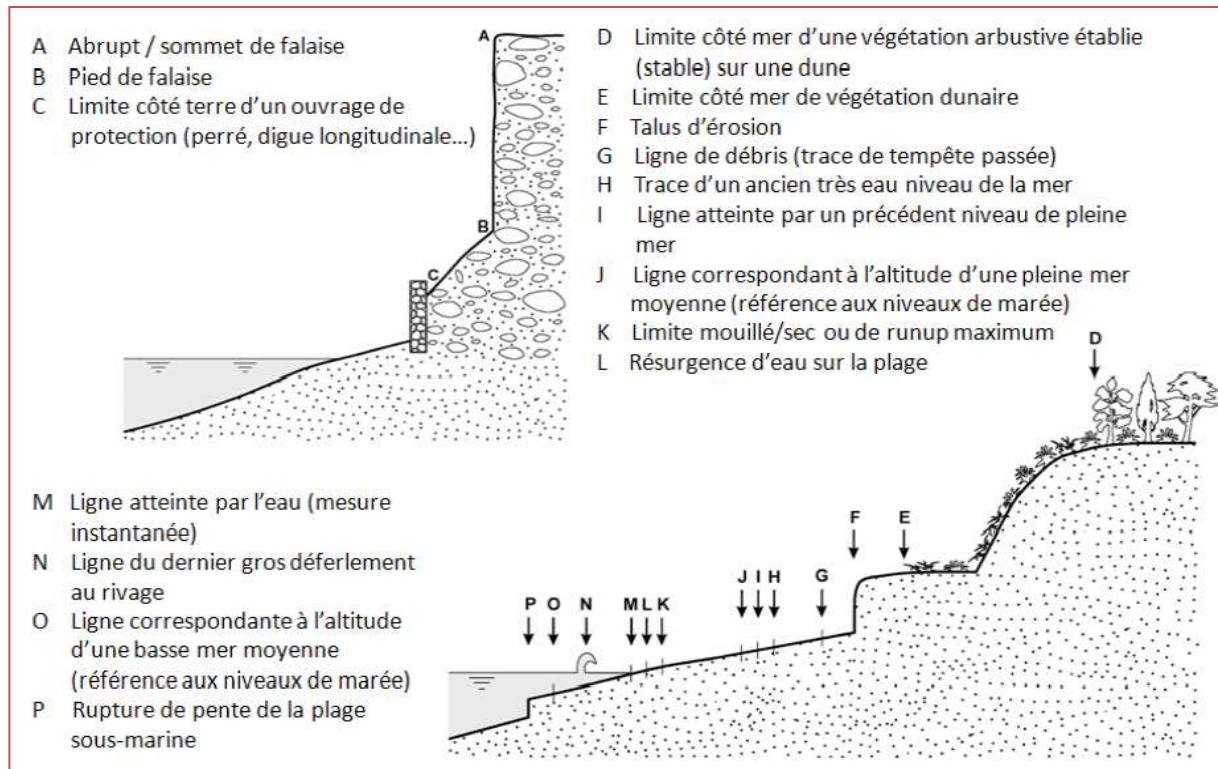


Figure 18: représentation des différents indicateurs du trait de côte (Elizabeth, *et al.* 2005)

2.4 Les besoins

Dans le cadre de notre étude, l'objectif était notamment d'effectuer des profils de plage transversaux et des levés du trait de côte.

2.5 Les méthodes de levé et d'acquisition du trait de côte

L'analyse spatio-temporelle de la ligne du rivage nécessite l'emploi de techniques à la fois, modernes et classiques. Pour travailler sur une période de temps la plus étendue possible, nous avons fait une comparaison entre les traits de côte obtenus à partir des méthodes et des données qui peuvent être disponibles pour donner le maximum d'informations pertinentes.

2.5.1 La photographie aérienne

Une photographie aérienne à but cartographique est caractérisée par son format, sa résolution pixel de 10 à 50 cm et par son échelle, allant de 1/8 000 jusqu'au 1/50 000 (Mellet, *et al.*, 2012).

- **Modes d'utilisation**

Les prises de vues aériennes sont souvent réalisées avec un intervalle de temps tel que deux clichés successifs ont un recouvrement de 60%.

La surface commune peut alors être vue en relief à l'aide de lunettes stéréoscopiques : il s'agit de la vision stéréoscopique. Cependant, cette technique nécessite une échelle haute (1/5000^e) et un grand nombre de clichés pour suivre le trait de côte (Mellet, *et al.*, 2012).

- **Méthodes de traitement**

Les images brutes saisies, sont redressées (mises en conformité géographique) et géoréférencées. Il est nécessaire pour cela de disposer de points de référence géographique de façon à localiser, recalcr et redresser les images, et éliminer ainsi les déformations dues à la prise de vue. Les images sont intégrées dans un ensemble d'images pour constituer un orthophotoplangeoréférencé, géré ensuite par un Système d'Information Géographique (SIG).

2.5.2 Les levés DGPS (GPS Différentiel)

Le DGPS (Differential Global Positioning System) consiste à utiliser un récepteur GPS, appelé « base » positionné sur une station dont les coordonnées sont connues. Cette base est couplée à un ou plusieurs GPS mobiles distants. Les deux GPS, base et mobile, réceptionnent simultanément les mêmes signaux issus des satellites, ce qui permet à chacun de calculer ses propres coordonnées.

Les corrections se font par comparaison entre sa position calculée à partir des signaux satellitaires et ses coordonnées absolues afin de les transmettre au GPS mobile, la transmission se fait par l'intermédiaire d'un système radio. Chaque levé génère un fichier de données dans la mémoire du GPS. Il existe deux types de levés pour mesurer des coordonnées de points à partir d'un DGPS, (Fig.19) :

- Levé RTK (« Real Time Kinematic »), la mesure (cinématique) se fait selon une précision centimétrique en temps réel (instantanée).
- Levé PPK (« Post Processing Kinematic »), la mesure (cinématique) est faite en temps différé, c'est-à-dire qu'elle nécessite un post-traitement pour atteindre une précision centimétrique. (Mellet, *et al.*, 2012).

Dans le cadre du travail, nous avons opté pour le mode RTK pour l'élaboration des levés du trait de côte.

Le GPS mobile est positionné en temps réel en recevant les corrections émises par la base. Celle-ci est déployée de manière spécifique et temporaire sur la zone d'étude.

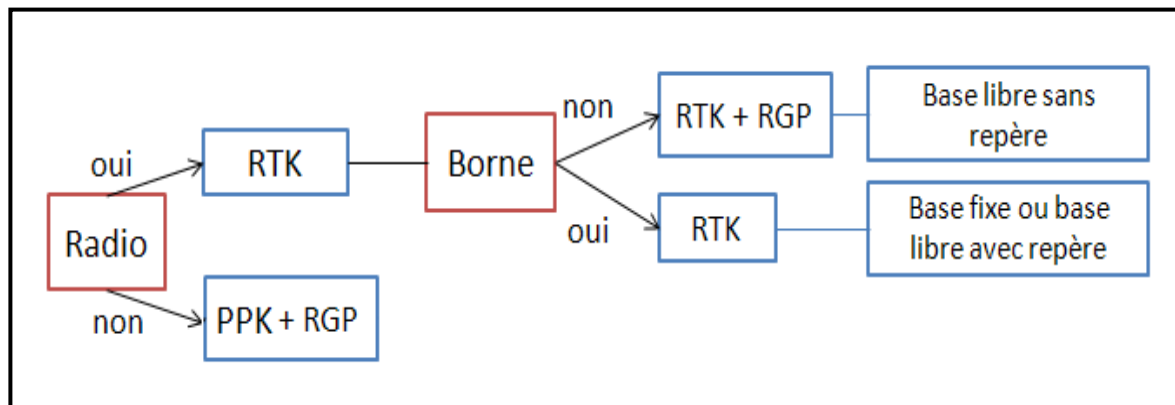


Figure 19: Les deux types de levé DGPS (© BRGM, 20)

Pour une utilisation optimale, la base est installée au-dessus d'une borne repère (point géodésique), de coordonnées connues, de manière à obtenir une précision centimétrique en (x, y, z) : c'est le principe de la méthode « base fixe ». Cette méthode ne nécessite pas de post-traitement particulier avant exportation sous SIG. (POC, 2000)

En RTK, il existe deux méthodes d'acquisition de points :

- **Topo continue (Auto topo)** : utilisée lors de l'acquisition de points en continu, pour le levé du trait de côte, du pied de falaise ou du sommet de falaise. Une acquisition régulière en fonction du temps ou en fonction de la distance peut se faire.

- **Point topo** : utilisée lors de l'acquisition de points le long d'un transect ou de points remarquables.

- **Modes d'utilisation**

Ce système permet d'effectuer des levés de trait de côte, des profils topographiques et des modèles numériques de terrain (MNT) sur tous types de milieux dès lors qu'ils sont accessibles. En se référant à un réseau de bornes maintenu par l'APPL (Agence de la protection et de la promotion du littoral) dans le cadre de son réseau de suivi du trait de côte dans toute la zone algéroise. La résolution des levés pour les suivis du trait de côte et des transects varie de 2 m à 10 m. Les transects sont définis par une ligne de base imaginaire passant par un couple de bornes géodésiques.

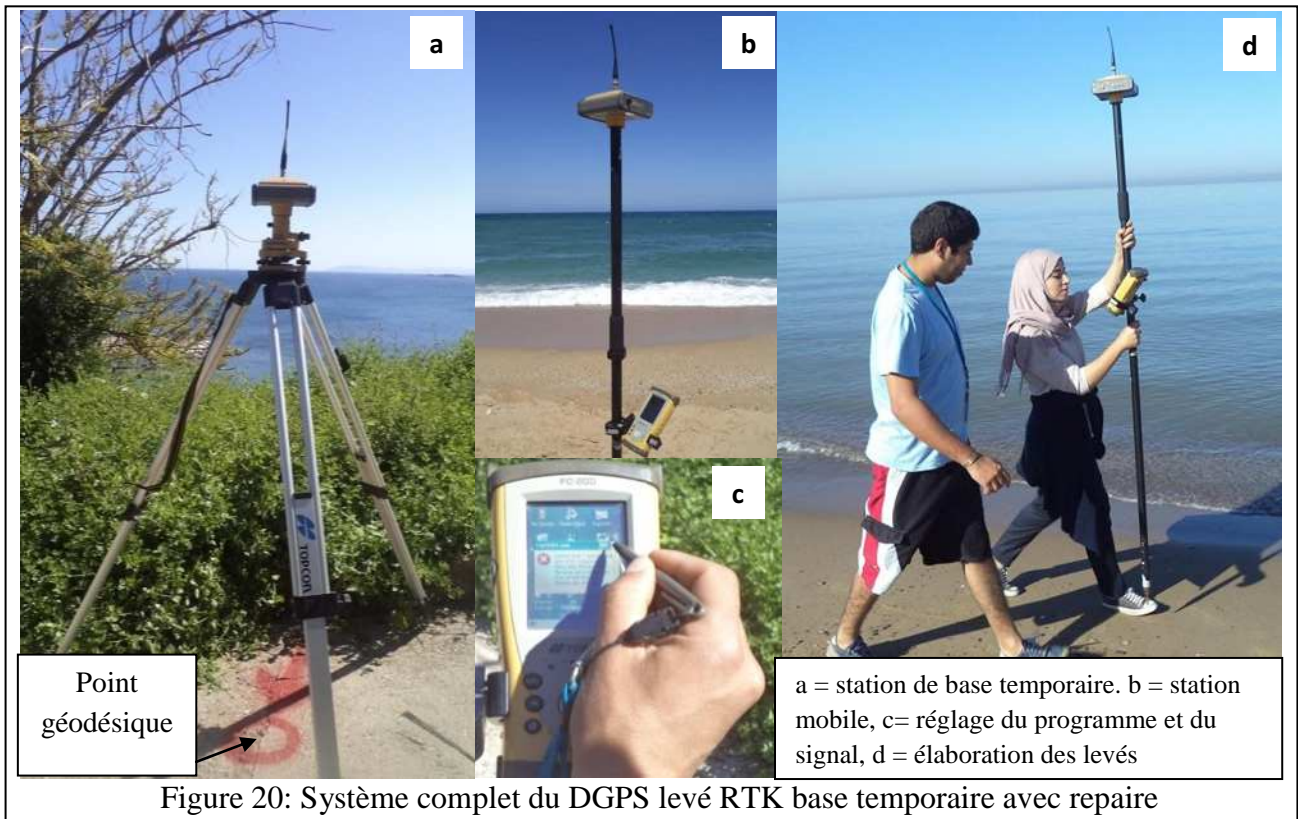


Tableau 5: Présentation des données exploitées et leurs sources.

Année du trait de côte	Méthode d'acquisition	Etablie par
1959	Photographie arienne au 1/25000	APPL
1972	Photographie arienne au 1/20000	APPL
1980	Photographie arienne au 1/10000	APPL
1999	Photographie arienne au 1/ 10000	APPL
2003	Photographie arienne au 1/10000	APPL
2014	DGPS	APPL
2015	DGPS	BENGOUFA, S. PFE_APPL
2016 (levé hivernal)	DGPS	BENGOUFA, S. PFE_APPL

2.6 Les outils et les méthodes de traitement

Après l'acquisition des données des photos aériennes, des levés topographiques de profils de plages et de trait de côte, nous avons effectué un traitement en nous basant essentiellement sur l'utilisation des logiciels du SIG à savoir le MapInfo[®] et ArcGis[®] 10.1 afin de :

- Elaborer des graphes présentant l'évolution du trait de côte entre 1959 et 2016.
- Elaborer des cartes illustrant les variations du trait de côte entre 1959 et 2016 à l'aide du logiciel SIG : MapInfo[®].

La première étape consiste à extraire les données relevées et stockées dans la mémoire interne de l'ordinateur associé au DGPS, et les traiter à l'aide du logiciel MapInfo[®], en digitalisant en premier lieu les points relevés afin d'avoir le trait de côte tout entier, puis en superposant ce dernier avec les trait de côte des années précédentes déjà traitées.

Dans une deuxième étape, le tracé des transects est recommandé afin d'estimer le taux de variation et l'évolution spatio-temporelle des traits de côtes.

Pour illustrer le changement diachronique de la position de la ligne du rivage de notre zone durant une période de 57 ans, nous avons élaboré des cartes à l'aide du logiciel MapInfo[®] dont le sens diachronique de l'évolution entre un trait de côte récent et ancien est représentée grâce à un code couleur suivant une norme de nuance des plus chaudes qui représente les années les plus récentes, vers les plus froides.

3 Présentation et interprétation des résultats

Les variations du trait de côte sont évaluées à partir de 190 transects plus au moins perpendiculaires à la ligne de base, avec une équidistance de 20m répartis entre la rive est de l'oued Réghaia (plage El kadous) jusqu'à l'extrémité ouest de la Plage Zezouria, (les mesures du trait de côte ont été effectuées d'une façon discontinue cela, est dû à la nature rocheuse de la côte et les constructions pied dans l'eau qui ont rendu l'accès très difficile.

L'évolution de la ligne du rivage de 1959 jusqu'à 2015-2016 a connu des phases en érosion et d'autre en accrétion selon les secteurs, dont les taux nets d'évolution montrent des valeurs négatives, ainsi que des valeurs positives.

En effet, pour mieux cerner la dynamique du trait de côte sur une échelle de temps de 57ans, nous avons opté pour une analyse rétrospective en subdivisant la zone en plusieurs secteurs.

- **La côte Réghaia- Elkadous**

La période 1959-1972 a connu une accrétion considérable le long de cette côte notamment au niveau de la plage Elkadous située entre les transects 25 et 55 (fig.21), le trait de côte a avancé de 5 à 40 m, tandis que la rive gauche de l'embouchure de l'oued Réghaia (transect 1 à 18) (fig.22) a connu un recul de 5 à 10m, soit un taux net de recul de l'ordre de -0.15 à -0.6 m/an. Cependant, dans la période 1972-2003 le secteur de Réghaia (transects 1-18) a connu un recul de 17 m soit un taux net de l'ordre de -0.30m/an, la côte a connu un engraissement généralisé, au niveau de la plage d'Elkadous (transects 25-55), dont les taux nets moyens enregistrés varient entre 0.61m/an et 1.96m/an. Durant la période 2003-2014 la zone a enregistré une tendance vers un engraissement considérable jusqu'à atteindre un avancé du trait de côte de l'ordre de 20m au niveau d'Elkadous, cependant, depuis l'année 2014, le secteur Réghaia-Elkadous connaît une érosion modérée, avec un taux net de recul -0.3m/an.

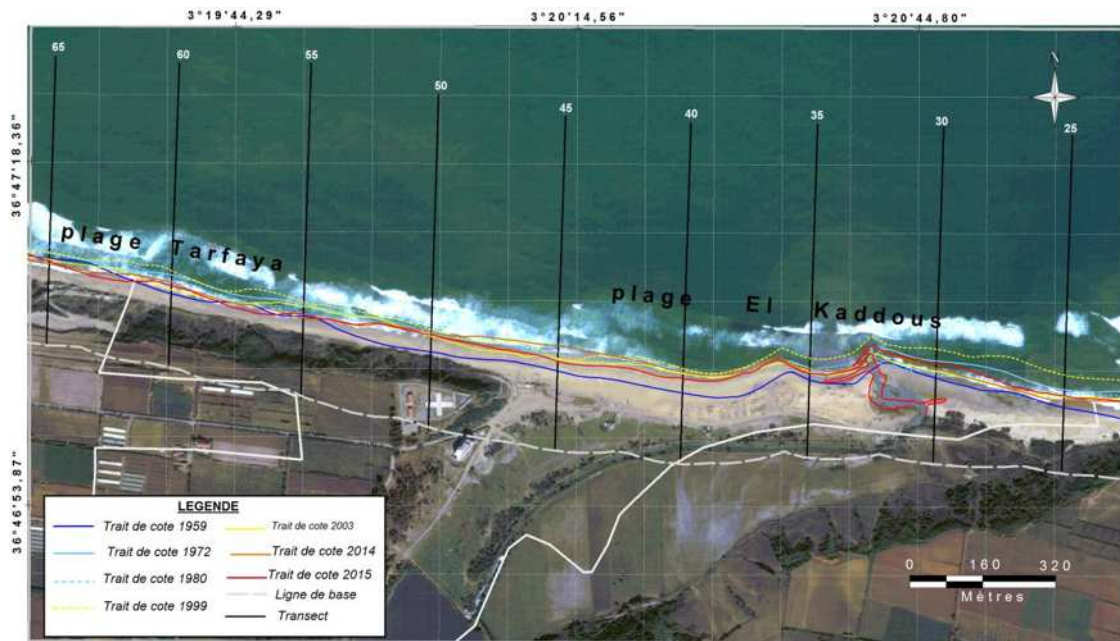


Figure 21: Evolution du tait de côte du secteur Elkadous entre 1959 et 2015

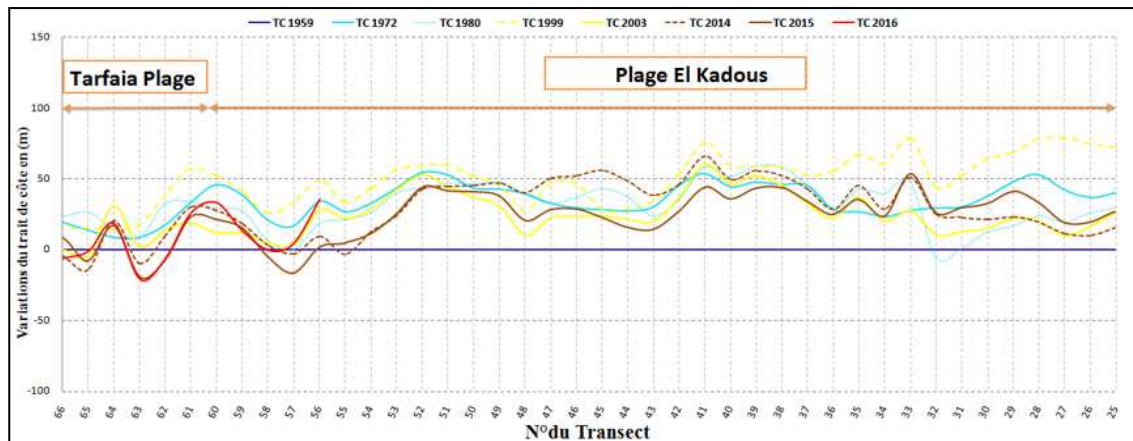


Figure 22: Variation du trait de côte du secteur Elkadous dans la période 1959-2016

- **Le secteur Déca plage-Surcouf-Flots bleus**

Le secteur compris entre les transects 60 et 110, qui correspond à la plage Surcouf, Déca plage, et les Flots bleus (fig.23), a connu, durant la période 1959-1972, un recul marquant où les taux nets de recul enregistrés varient entre -1 et -3.7 m/an.

Cette tendance continue ses répercutions jusqu'a 2003, où une forte érosion s'observe au niveau des plages Surcouf et Déca plage (transects 70 à 100), dont la valeur moyenne du recul du trait de côte varie entre -15m et -36m.

La période 2003-2014 est marqué par la mise en place des aménagements de protection au niveau de la plage Surcouf ce qui a engendré une tendance à un engraissement localisé au niveau du transect 88, jusqu'à l'année courante (2016) les taux nets de

variation du trait de côte au niveau de ce secteur tendent vers une stabilisation et varient entre -0.8m/an (tranchet 79) et +0.6 (tranchet 61).

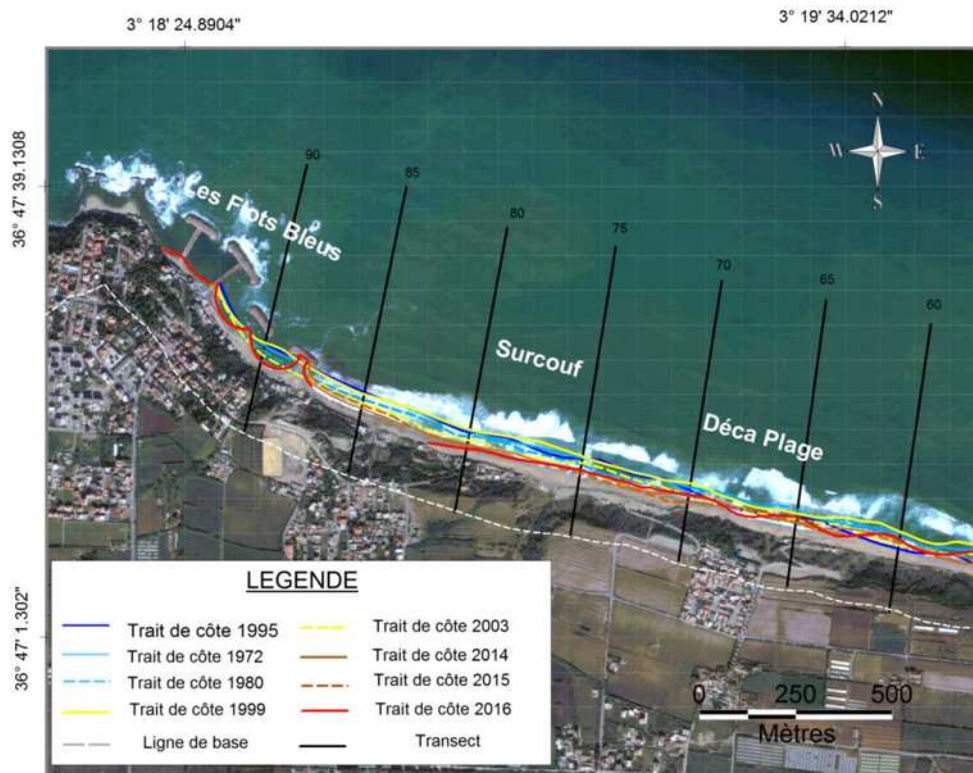


Figure 23: Evolution du trait de côte, secteur Déca plage-Surcouf-Flots bleu durant 1959_2016

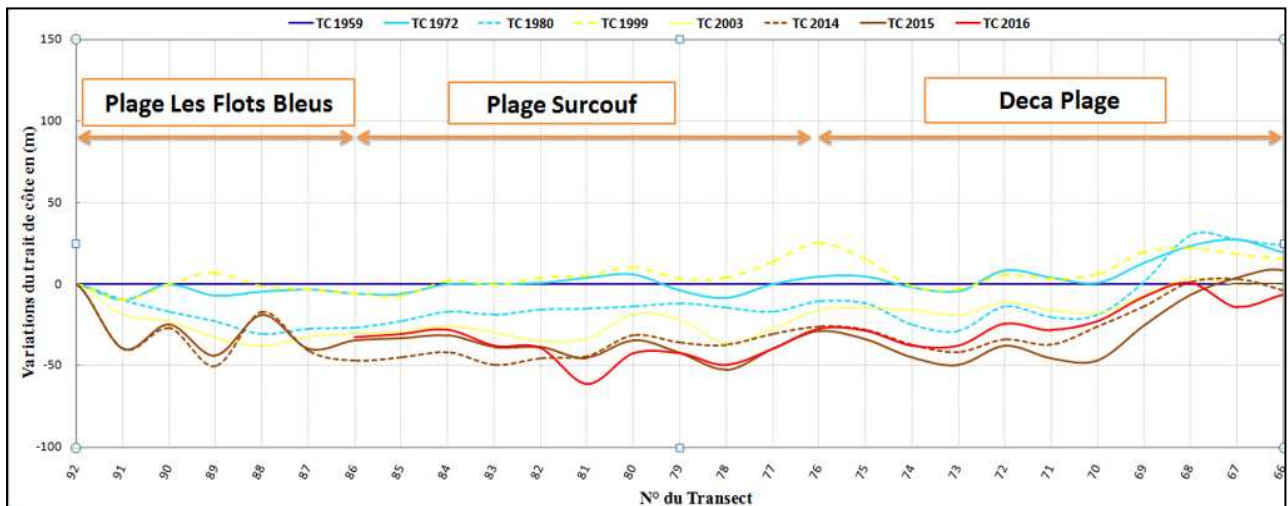


Figure 24: Variation du trait de côte du secteur Déca plage, Surcouf, Folt Bleu, durant 1959-2016

- **La côte Tmaris – Zerzouria**

Durant la période 1959-1972 la plage Tamaris a été marquée par une avancée de la ligne de rivage pour atteindre une accréation maximale de 35m au niveau du transect 117. Cependant, depuis l'année 1972 la frange côtière du secteur Tamaris connaît une

érosion marquante avec un recul maximal de 25m durant l'année 2015, soit un taux net annuel de recul de -0.4m/an (fig.25)

Tandis que, le secteur Zerzouria est caractérisé par des variations non homogènes du trait de côte, durant toute la période étudiée, nous remarquons que les taux nets de variation de sa ligne du rivage sont essentiellement compris entre +0.1m et -1m, soit des avancées maximales de l'ordre de +15m et des reculs de -50m (tranchet 162) qui a permis d'observer la plus forte valeur de recul enregistrée le long des 190 transects.

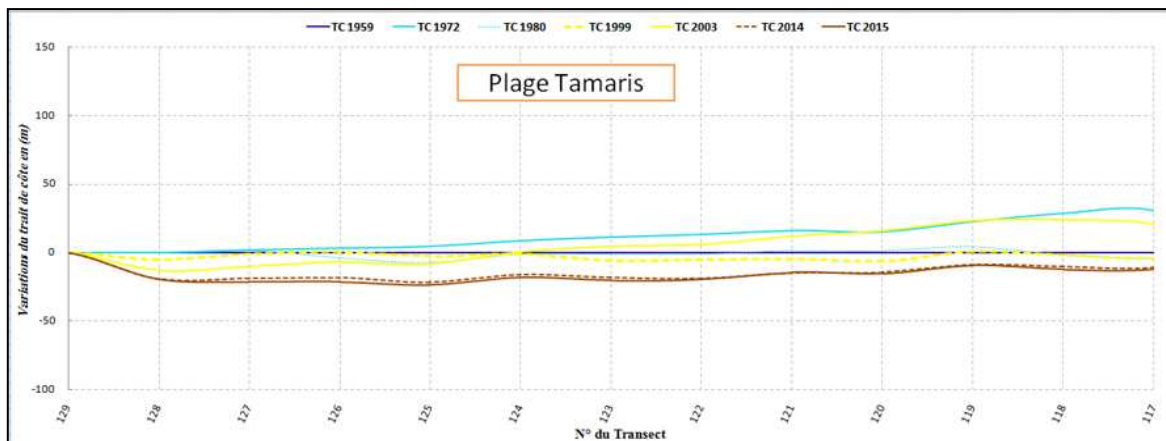


Figure 25: variation du trait de côte de la plage Tamaris durant la période 1959-2015

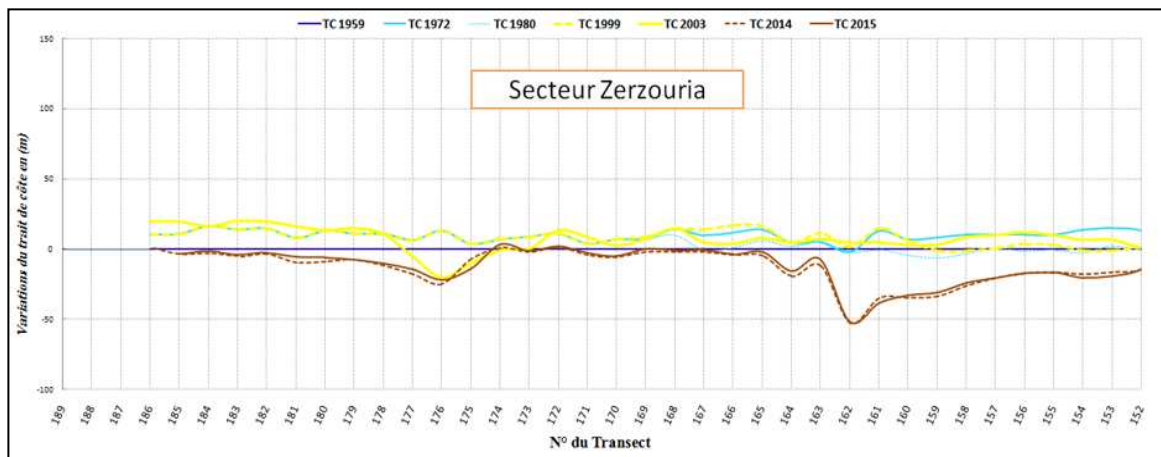


Figure 26: Variation du trait de côte du secteur Zerzouria durant la période 1959-2015

• **Synthèse sur la variation du trait de côte**

L'analyse de l'évolution du trait de côte, pour l'ensemble de la période 1959-2016, nous a permis de constater que la côte a connu un recul de la ligne de rivage sur la totalité des 190 transects. Ce pendant, ce recul n'est pas régulier ; nous avons noté les plus fortes valeurs de recul au niveau de la plage Surcouf, et le secteur Zerzouria, qui ont atteint les -65m (fig.27). Sur la totalité de la zone qui s'étend du transect 60 à 190 les taux moyens annuels enregistrés durant la période étudiée varient entre -0.17m/an et -1.66m/an.

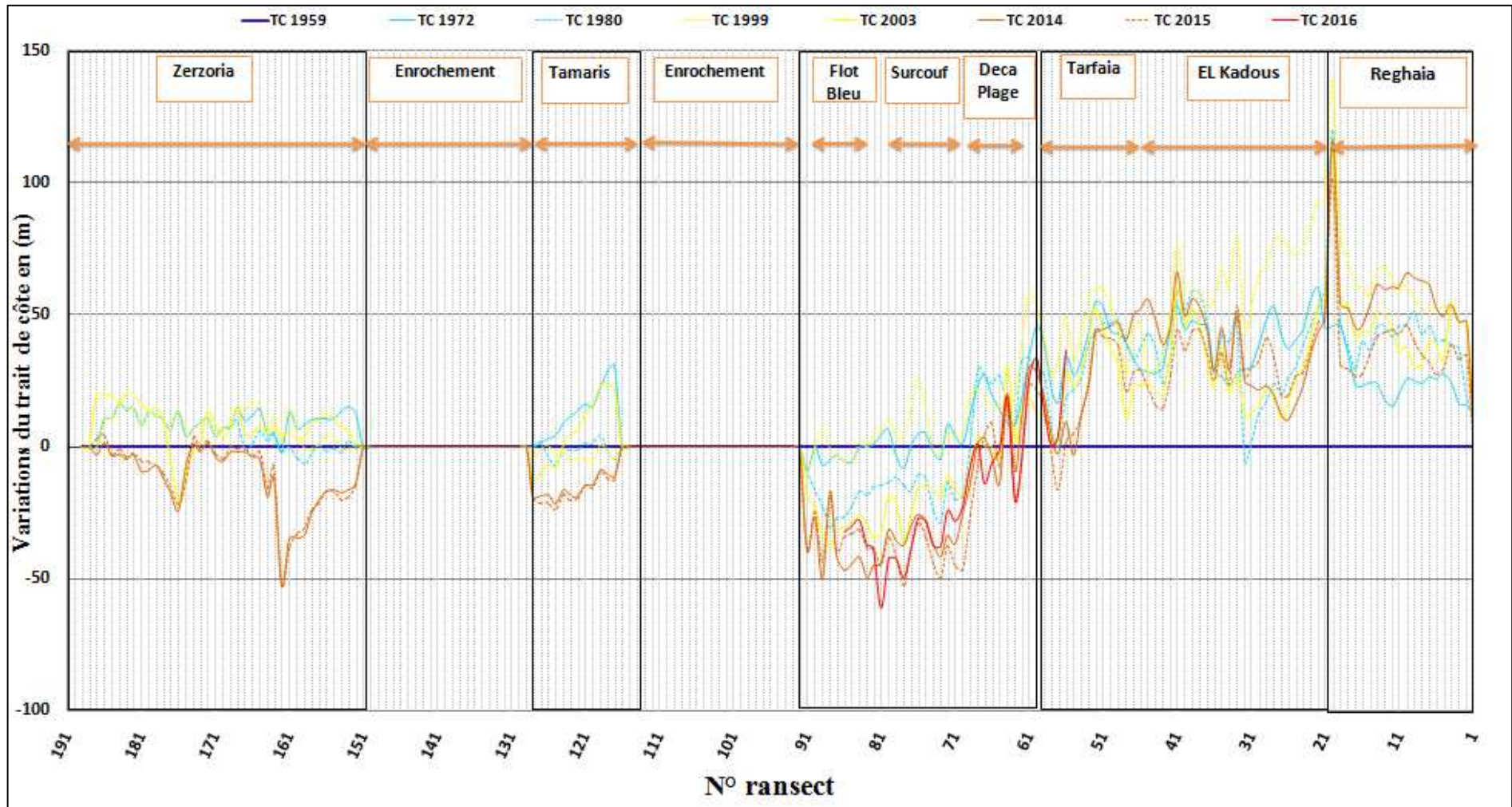


Figure 27: variation du trait de côte sur toute l'étendue de la zone d'étude (Réghaia-Zerzoria) de 1959 jusqu'à 2015-2016

4 Conclusion

L'évaluation de l'état de notre zone d'étude face au phénomène de l'érosion, a nécessité une analyse diachronique de la position de la ligne du rivage sur une période de 57ans, cependant cela a nécessité l'emploi de techniques qui peuvent s'intégrer pour assurer au mieux la fiabilité des résultats (la photographie aérienne, les images satellitaires et des levés topographique au DGPS).

L'analyse de la variation du trait de côte entre 1959 et 2015-2016 nous a permis de constater trois secteurs bien distincts en fonction du taux net du recul du trait de côte ;

- Le premier secteur englobe les plages de Surcouf et Flots bleus jusqu'à Zerzouria qui ont enregistré un taux de recul le plus élevé atteignant -1.8m/an . A noter qu'à partir de l'année 2003 ce secteur a connu une stabilisation voir même un petit engraissement, après l'implantation des ouvrages de protection à savoir les deux brise-lames des Flots bleus.
- Les plages de la rive gauche de l'oued Réghaia, ont subi une érosion modérée, en effet, durant cette même période, nous constatons un recul considérable du trait de côte qui est du pratiquement aux faibles apports de l'oued Réghaia.
- Le troisième secteur qui correspond aux plages, Tarfaia Elkadous et Déca plage, a enregistré le taux net de recul le moins élevé par rapport aux autres secteurs, dont la vitesse maximale est -0.6m/an .

Chapitre III

Fonctionnement hydro-sédimentaire

(Modélisation numérique)

1 Introduction

L'ampleur des évolutions des littoraux dépend de la puissance des forçages hydrodynamiques, du temps de réponse des systèmes et des capacités techniques à observer ces modifications (Khalfani, 2014). L'étude de ces évolutions consiste d'abord à comprendre les phénomènes hydrologiques qui constituent une source d'énergie absorbée par les forces de défense naturelles du système littoral telle que la pente puis la quantification du transport sédimentaire induit par ces forçages.

L'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral démarre par une analyse globale comprenant notamment une analyse géomorphologique, une analyse des conditions météorologiques (déjà abordée dans le chapitre I) et une analyse hydrodynamiques. Enfin, une synthèse permet de définir précisément le périmètre d'étude et les aléas à considérer et pour chaque aléa à caractériser, les principaux phénomènes à leur origine, permettant de définir les méthodes de caractérisation et les hypothèses adaptées. (Costa, 2015)

L'objectif principal de ce chapitre consiste à reconstituer le climat hydro-sédimentaire qui domine notre zone d'étude dans une échelle de temps précise, pour aboutir à un modèle numérique qui superpose les processus hydro-sédimentaires (Houle, courant et transport sédimentaire), afin de donner quelques éléments de réponse à la problématique posée qui est la détermination de l'état de vulnérabilité de notre zone d'étude.

Pour atteindre cet objectif nous avons divisé ce chapitre en trois:

- En premier lieu les données nécessaires pour la simulation ont été récoltées, en plus d'une étude bathymétrique, qui est une étape basique pour parvenir à une modélisation du fonctionnement hydro-sédimentaire.
- Dans un deuxième une détermination des modules intégrés dans un système de modélisation Mike21a été faite, en fonction de nos besoins dans l'objectif d'avoir un aperçu hydro-sédimentaire de la zone.
- Au finale nous présentons et interprétons les résultats issus de la simulation sous le Mike21.

2 Données nécessaire pour la modélisation numérique du fonctionnement hydro-sédimentaire

Le modèle numérique utilisé dans le cadre de notre étude est le MIKE21-DHI de l'institut hydraulique Danois (DHI) qui est un puissant système de modélisation numérique des phénomènes physiques (Houle, Courant et Transport sédimentaire), il permet de faire des simulations à grande échelle et d'augmenter la résolution des mailles de calculs à certains endroits du domaine simulé à l'aide de grilles imbriquées (Khalfani, 2014).

De façon à simuler le plus précisément possible le fonctionnement hydro-sédimentaire, il s'agit dans un premier temps de recueillir l'ensemble des données disponibles nécessaires à la simulation, ces données sont

- Des données bathymétriques.
- Des données relatives aux conditions météorologiques
- Des données de niveau d'eau.

2.1 Les données bathymétriques

Comme étant une donnée de base pour la modélisation du fonctionnement hydro-sédimentaire d'une zone côtière, une carte bathymétrique demeure indispensable.

Par définition la bathymétrie est la mesure de la profondeur d'une surface immergée. Classiquement, cette mesure s'élabore grâce à un échosondeur, c'est instrument qui analyse le temps de l'aller-retour d'une onde acoustique se réfléchissant sur le fond.

L'acquisition des données bathymétriques de notre zone d'étude a été faite par digitalisation d'une carte marine établie par le Service Hydrographique des Forces Navales (SHFN), en plus des données récentes de la bathymétrie des petits fond fournies par le laboratoire des études maritimes (LEM)

2.2 Des données relatives aux conditions météorologiques

Les conditions météorologiques extraites de la base de données MedAtlas (1999-2004) et qui règnent la zone d'étude ont été abordées dans le premier chapitre, dont nous tirons les constatations nécessaires à l'élaboration du model de simulation, citant :

- Les houles les plus fréquentes proviennent des deux secteurs ouest (27% annuellement) et nord-est (N45°) (43% annuellement) avec des hauteurs comprises entre 0.25 et 2.5m.
- Les classes de périodes piques (T_p) dominantes sont comprises entre 3 et 9 s

avec une fréquence de 49% du temps.

- Les houles du secteur N60° sont dominantes en saison estivale, avec des amplitudes maximales qui ne dépassent pas les 1.75m
- Durant la période hivernale les agitations marines sont provoquées par les houles du secteur N360°, N60° et N270° avec des amplitudes maximales de l'ordre de 3m.

2.3 Les données relatives au niveau de la mer et au marnage

Le marnage n'a pas été pris en considération lors de la configuration des différents modules de simulation intégrés dans le système du Mike 21, du fait que le niveau des marées est insignifiant, vu que notre zone d'étude est caractérisée par une côte microtidale. (Planton, *et al.*, 2012), les valeurs de la surcôte entretenues, sont prises comme une constante qui est égale à 0.34m.

3 Mise en place du model

L'approche de la modélisation entretenu dans notre cas d'étude fait appel à un système de modélisation intégrée comprenant trois modèles numériques : un modèle hydrodynamique, un modèle de vagues et un modèle de transport de sédiments non-cohésif (sables) sous l'effet combiné des vagues et des courants.

3.1 Emprise du model et maillage utilisé

Un modèle d'emprise a été mis en place afin de prendre en compte les différents phénomènes ayant une relation avec les aléas observés dans la zone d'étude. Le maillage en éléments finis autorise une grande souplesse dans la représentation de zones complexes et dans la distorsion entre mailles, notre model présente une extension de l'ordre de 1.5 kilomètres du nord au sud et de 16 kilomètres d'est en ouest.

3.2 Modèle couplé MIKE21/3 FM

Le modèle couplé MIKE21/3 FM comprend différents modules et leurs couplage. Les modules choisis sont le **SW** (Spectral Waves model), **HD** (Hydrodynamic model) et **ST** (Sand Transport model) du système MIKE 21 couplé par le model MIKE21/3FM, les modules HD et SW fonctionne de même sorte qu'avec le modèle de couplage sauf le ST, ce dernier n'utilise que le ST.Q3D (un outil de création de table sédimentaire) dans le modèle couplé, en cas de houles et de courants combinés. Le modèle couplé dans la présente étude a concerné le module ST, SW et HD de la houle de provenance N°45, dans le choix est justifié ultérieurement.

3.3 Simulation de la propagation de la houle par le module SW (Spectral waves model)

Dans un premier temps, il s'agit de déterminer à l'aide du modèle SW le climat de houles dans la région d'intérêt (sur une grande échelle). Le modèle SW simule la croissance des vagues par l'action du vent, l'interaction non-linéaire vague-vague, la dissipation dû au moutonnement, la dissipation dû au frottement de fond, la dissipation dû au déferlement de la vague, la réfraction de la houle par les variations de profondeur, et l'interaction vague-courant et l'effet de profondeur d'eau variant dans le temps (Roche, 2011).

3.3.1 Configuration du module SW

L'équation choisie pour étudier la propagation de la houle au large, est la formule directionnelle dans le domaine spectral et la formule quasi-stationnaire dans le domaine temporel, avec la méthode d'itération de Newton & Raphson.

Les niveaux d'eau ont été considérés nuls en négligeant le forçage par les vents. Cependant, nous avons pris une valeur constante de coefficient de déferlement $\gamma = 0.8$ avec un effet de dissipation par le fond exprimé dans le modèle par la formule de Nikuradse qui considère le paramètre de rugosité du fond comme étant une constante égalant à 0.04. La limite nord a été choisie comme étant ouverte avec des paramètres constants dans le temps et tout au long de ces limites.

Le modèle a concerné 4 directions dominantes déjà traité (chapitre I)

- les directions N45°, N60° N316° et N360°
- la hauteur significative $H_s = 2.56, 1.75, 3, \text{ et } 1.73\text{m}$ respectivement.
- la période pique $T_p = 8\text{s}, 4.6\text{s}, 6.2\text{s}, 4.7\text{s}$ respectivement.
- l'Indice d'étalement directionnel $n=4$

3.3.2 Présentation et interprétation des résultats

Le climat des houles a été simulé afin de réaliser un plan de vague en se basant sur quatre directions principales :

- Les houles qui proviennent des directions N60° sont très fréquentes lors de la saison estivale, elles arrivent à la côte d'une obliquité de 30 à 45° par rapport au rivage ces houles au large ont une hauteur significative H_{s0} de 1.75m, en arrivant à la côte les hauteurs significatives H_s seront comprise entre 0.04 et 1.45m (fig.28) avec des coefficients (H_s/H_{s0}) maximales de 0.82. la figure 28 montre que les plans de vague provenant de ce secteur sont peu réfractés.

- Les houles de secteur N316° d'une hauteur significative au large $H_{s0}=1.73\text{m}$ arrivent à la côte avec une obliquité de 10 à 25° et des hauteurs significatives comprises entre 0.5m -1.6m (Fig.29) avec des coefficients qui varient de 0.28 à 0.92.
- Cependant les houles de secteur N360° engendrent des hauteurs significatives à la côte qui varient entre 1 et 2.6 m dont le rapport (H_s/H_{s0}) a une valeur maximale de l'ordre de 0.82, toute fois; comme celles du secteur N60°, ces houles sont peu réfractées, et elles induisent une dérive littorale vers l'ouest.
- La N45°, la direction des houles la plus importante à étudier, qui apparaisse surtout dans les tempêtes printanières, lors de laquelle nous avons effectué nos levés DGPS, ces houles abordent la majorité de la côte étudiée perpendiculairement, ce qui engendre des courant de retour dans le sens opposé ; cela peut expliqué l'érosion marqué au niveau des plages Surcouf, Déca Plage, par contre au niveau de la partie est de la plage Elkadous, ces houles abordent d'une obliquité de 25°, ce qui explique l'érosion modéré au niveau de cette zone, D'après la figure (fig.31) nous remarquait que les houles qui arrivent des directions N45° avec une hauteur significative (H_{s0}) au large de l'ordre de 2.56m, ont des hauteurs (H_s) à la côte de valeurs de 0.02 à 2.23 m, voire des coefficients (H_s/H_{s0}) avec un minimum de 0.007 (à proximité des ouvrages de protection et à l'abri au niveau des points), et 0.87 comme maximum. Avec de longues périodes piques à la côte comprises entre 7.8 et 6.5.

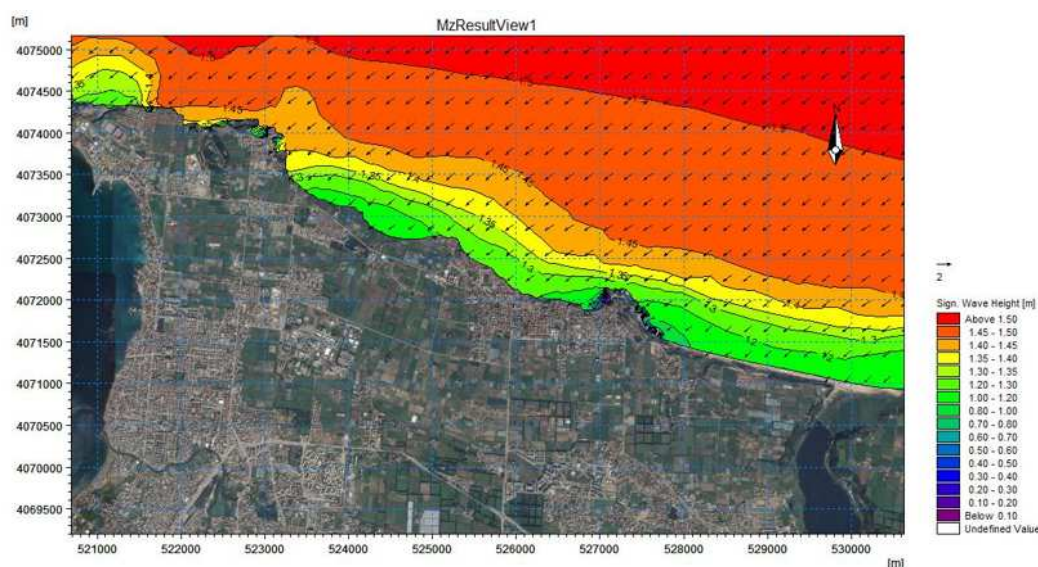


Figure 28: représentation de la propagation des houles du secteur N60° ($H_{s0}=1,75$ $T_p=4.6$)

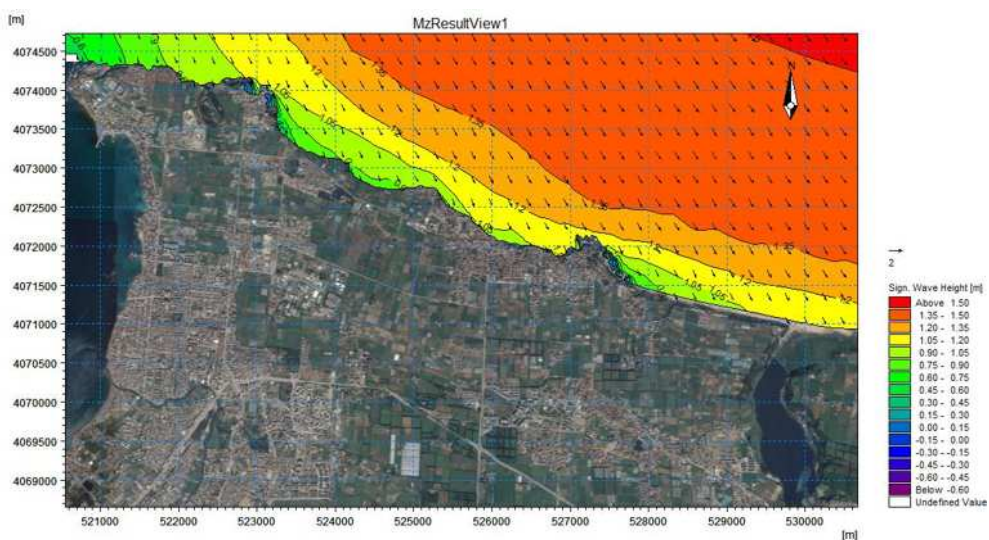


Figure 30: Présentation de la propagation des houles du secteur N316° ($H_s=1.73$ $T_p=4.6$)

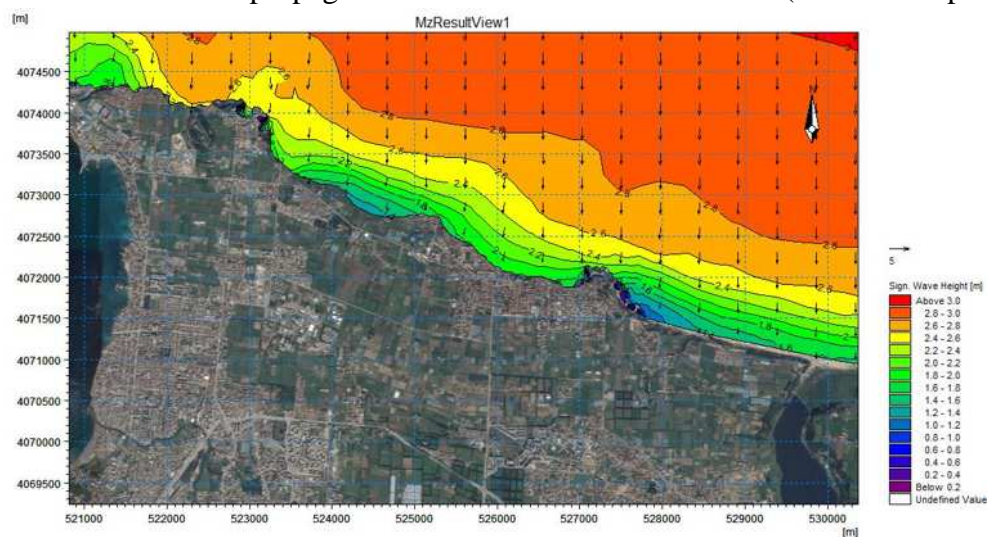


Figure 29: Représentation de la propagation des houles du secteur N360° ($H_s=3.18$, $T_p=6.2$)

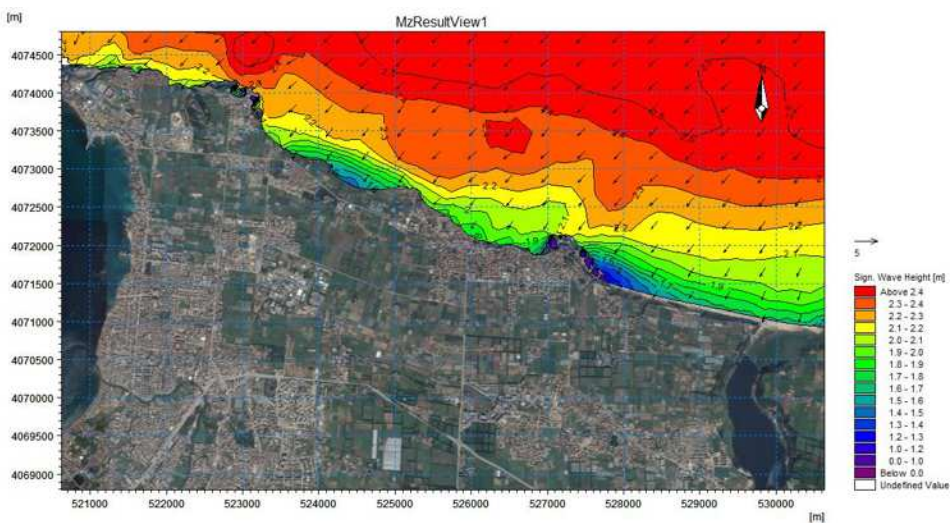


Figure 31: Représentation de la propagation des houles du secteur N45° ($H_s=2.56$ $T_p=8$)

3.4 Simulation des champs de courants générés par la houle et les vents par le module HD

La modélisation des champs de courants générés par les houles approchant le rivage, se fait au moyen du module HD, dont les sortants du module SW ainsi que les niveaux d'eau aux frontières ouvertes de la grille de calculs hydrodynamiques permettront de calculer la vitesse et les directions du courant.

3.4.1 Configuration du module HD

La période de simulation est étalée sur 144 heures du 20-6-2016 au 26-6-2016. Elle est effectuée sur la grille de calcul 45° vu que se sont les houles en provenance du nord qui ont dominé pendant cette période.

Les pas de temps pour toutes la simulation a été fixée à 1800 sec avec les paramètres suivants :

- Le niveau de la mer est considéré non variable.
- Les flux tout au long des limites ouvertes sont considérés perpendiculaires par rapport aux limites. Par conséquent la surface initiale est considérée nulle aussi.
- La viscosité et la résistance sont considérées comme valeurs par défaut (0.28 et $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ respectivement).
- Les vents ne sont pas pris en considération.
- La valeur de la surcote est prise comme une constante égale a 0.34m

3.4.2 Présentation et interprétation des résultats

La figure ci-après (fig.32/a) montre les champs de courants induits par les vagues calculées au moyen du modèle numérique MIKE21-HD pour les houles de direction nord-est ($N45^\circ$). D'un aperçu global, Le modèle hydrodynamique a mis en évidence un courant longshoreest-ouest généré par les houles en provenance de nord-est ($N45^\circ$).

Les houles de fortes amplitudes au niveau des épis (ouest de la plage Surcouf) génèrent un courant longshore de secteur ouest au niveau des plages est (Déca plage-Réghaia) pour former des vortex (tourbillons) (fig.32/b)

Un autre vortex est formé dans les plages Ouest, Le premier vortex forme un courant qui descend vers la côte et remonte vers le large. Tandis que le second, forme un courant qui descend vers la côte et prend ensuite une direction est-ouest pour ensuite se dévier vers le large au niveau des pointes et continuer la même direction le long de la côte étudiée.

Les vitesses des courants sont faibles et ne dépassent pas les 0.5 m/s.

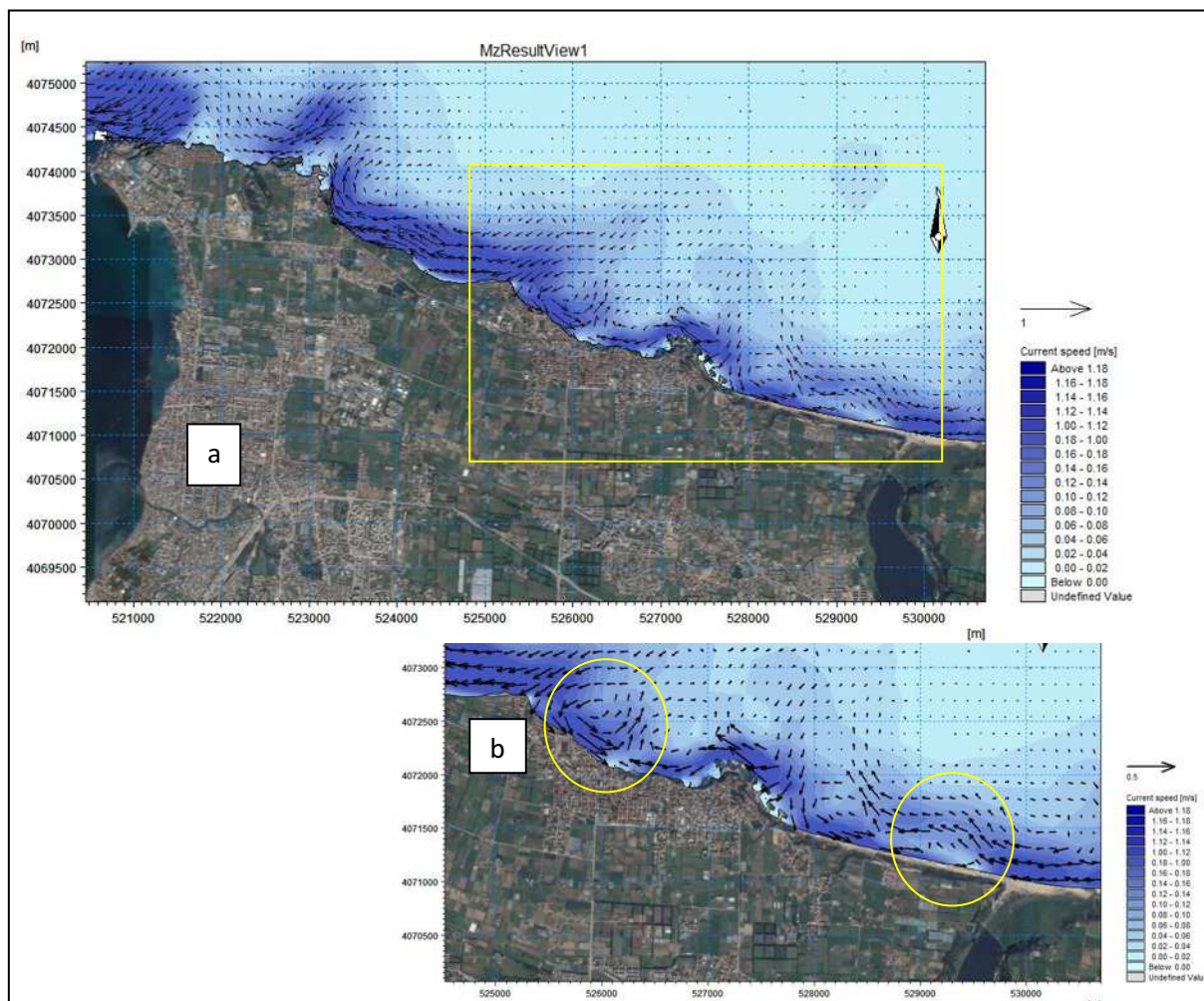


Figure 32: Représentation du champ du courant induit par les houles de secteur N45°

3.5 Modélisation du transport sédimentaire sous l'effet de houle et de courant

Finalement, les courants générés par le module HD et les champs de vague sortant du module SW seront pris en entrée par le modèle de transport de sédiment ST qui calcul alors le transport de sédiments à chaque pas temporel des simulations hydrodynamiques ainsi que le transport net de sédiments durant la période de simulation, qui sont calculés à partir de données bathymétriques, des profondeurs instantanées de l'eau.

3.5.1 Configuration du module ST

Une formulation intégrée, a été adoptée pour le calcul des taux de transport de sédiments elle est basée sur une description quasi-tridimensionnelle (Q3D) de l'hydrodynamique et du transport de sédiment qui décompose le transport dans des directions perpendiculaires et parallèles au courant, et au rivage dans la zone de déferlement des vagues.

Le module ST utilise des valeurs de transport de sédiments interpolées au préalable dans une « table de sédiment », cette étape est effectuée avant la simulation à l'aide de générateur de table de sédiment disponible dans le « MIKE21 Toolbox » avec le module ST. Les valeurs de transport interpolées au préalable sont utilisées au cours de la simulation numérique.

Cependant les paramètres granulométriques considérés sur l'ensemble du model sont :

- Le diamètre médian $D_{50}=0.2$ mm,
- Une porosité de 0.4.

3.5.2 Présentation et interprétation des résultats

Les transports des sédiments calculés dans la zone d'étude adoptent des unités de $m^3/s/m$ ce qui nous a amené à faire des calculs de conversions pour avoir des valeurs significatives des débits sédimentaires par an. L'interprétation de ces transports est basée sur le changement de l'intensité du transport d'une maille à l'autre. Par exemple, une diminution des vecteurs de transport d'une maille à l'autre indique une zone de convergence ou de dépôt potentiel des sédiments à cet endroit alors qu'une augmentation des vecteurs adjacents indique une divergence ou un potentiel d'érosion à cet endroit.

La direction de la houle $N45^\circ$ avec une période $T_p=8s$ et un $H_{s0}=2.56$ m, a été pris en considération, les autres directions semblent provoquer un faible transit sédimentaire, d'une façon générale, la direction $N45^\circ$ favorise une dérive littorale de l'est vers l'ouest.

(fig.33) En matière de débits sédimentaires, le modèle affiche une valeur maximale de $1766 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$ en provenance de l'est charrié vers les plages ouest de la zone, entraînée par les houles de direction $\text{N}45^\circ$. Le débit correspond à l'épisode de tempête provenue du nord-est avec des houles de hautes amplitudes pouvant atteindre les 2.6m au large. Les courants modélisés semblent favoriser un transport sédimentaire vers l'ouest, En effet les houles en provenance du nord-est ($\text{N}45^\circ$) engendrent un courant littoral est-ouest qui entraine les sables vers l'ouest. Lorsque les houles affrontent les épis au niveau de la plage Surcouf, le courant forme un vortex et entraine le sable vers le large. (Au niveau des cercles jaune) , en effet le courant circulaire évolue dans le sens contraire d'une aiguille d'une montre c'est-à-dire il descend vers la côte puis remonte vers le large en entraînant ainsi les sédiments dans ce même sens avec des flux sédimentaires de $1000 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$, Ces résultats mettent en évidence une dynamique sédimentaire importante dans le secteur d'étude et qui évolue dans le sens est-ouest pour un régime de houle en provenance du $\text{N}45^\circ$ Une zone de convergence et de dépôt sédimentaire est mise en évidence, cela au niveau de la plage Tarfaya et Elkadous, qui ont, effectivement, une tendance vers un engraissement d'après les résultats du suivi du trait de côte, cette concordance est confirmée par les vecteurs du transport sédimentaire, ces dernier ont un potentiel à se diminué d'une maille à une autre avec un débit sédimentaire de $188 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$, Au niveau des plages Surcouf, Tamaris et surtout le secteur Zerkouria, les vecteurs du transport sédimentaire indiquent une divergence voire une érosion très forte, du fait que ces vecteurs augmentent d'intensité d'une maille à une autre

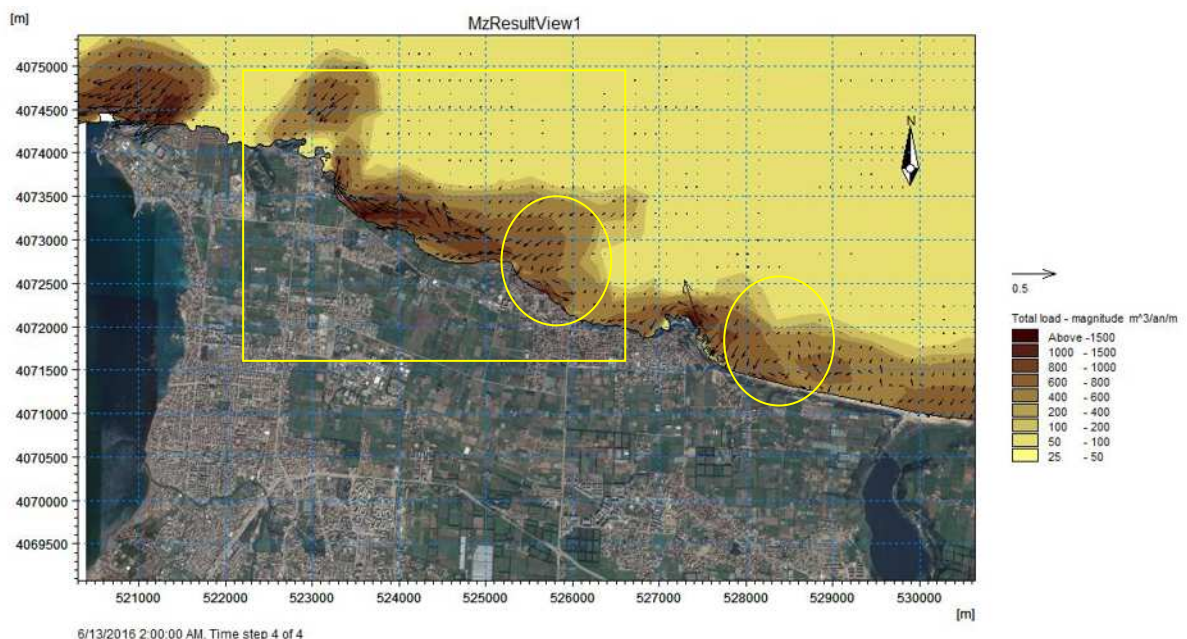


Figure 33: présentation du transport sédimentaire induit par la houle de provenance $\text{N}45$

4 Conclusion

La modélisation des champs de courants et des transports sédimentaires par les modules de calcul du Mike 21 nous ont permis d'élucider le fonctionnement sédimentaire qui règne la zone d'étude.

L'analyse des directions de courants simulés nous laissent déduire que la zone d'étude est sujette à un régime de courants méandriiformes complexe qui prend une forme en vortex générés par les ouvrages de défense implantés au niveau du secteur Surcouf.

L'aspect hydrodynamique doit être étudié d'une manière plus approfondie afin d'être sûr de la théorie de transformation de la houle pouvant engendrer une dérive littorale et cela par des méthodes de calibrage des modèles numériques et des mesure du courant in-situ.

Cependant, l'étude de propagation des houles du large vers la côte de provenance multiples (N45°, N60°, N316°, N360°) nous a permis de mettre en évidence les paramètres responsables de la génération de courants littoraux qui charrient des taux importants de sables dans le sens est-ouest. En effet pour la simulation du transport sédimentaire nous avons choisi la direction des houles la plus défavorable (N45°) avec de grandes amplitudes au large, afin d'avoir une estimation des débits sédimentaires, de la direction du transite lors des périodes de tempêtes, ainsi que pour la détermination des zones à potentiel d'érosion ou d'accrétion dans le but de confirmer les résultats du suivi du trait de côte élaboré dans le chapitre II, dans ce contexte deux zones distinctes sont mises en évidence :

- Le secteur Elkadous-Terfaya, connait un engraissement par rapport aux autres plages, avec un débit sédimentaire modéré de $188\text{m}^3/\text{an}/\text{m}$.
- Le secteur Surcouf, Tamaris et Zerzouria connait une érosion très forte avec un maximum au niveau du secteur Zerzouria

Ces résultats concordent avec les constatations précédemment promu, ce qui leur donne de la crédibilité, les levés in-situ de bonne précision et la modélisation numérique peuvent nous aider à faire sortir une interprétation finale qui reflète le mieux les phénomènes présents

Chapitre IV

Evaluation de la vulnérabilité (Calcul des indices)

1 Introduction

La démarche géomatique dans l'appréhension spatiale des risques est actuellement évoquée selon une approche pragmatique. Depuis une synthèse cartographique élémentaire jusqu'au recours à de la modélisation en passant par des concepts intermédiaires, diverses étapes d'appréhension conceptuelle de la vulnérabilité côtière sont évoquées dans ce dernier chapitre dans une approche de formalisation, du risque dans le cadre d'une synthèse spatiale, modélisation et simulation dynamique.

Au sens le plus large, la vulnérabilité est définie comme « ‘Le niveau de conséquences prévisible d'un phénomène naturel sur les enjeux. On peut distinguer la vulnérabilité économique et la vulnérabilité humaine. La première traduit généralement le degré de perte ou d'endommagement des biens et des activités exposés à l'occurrence d'un phénomène naturel d'une intensité donnée [...] La vulnérabilité humaine évalue d'abord les préjudices potentiels aux personnes, dans leur intégrité physique et morale. Elle s'élargit également à d'autres composantes de la société, et tente de mesurer sa capacité de réponse à des crises' » Garry, 1997 » (MEDDTL, 2010)

Ce dernier chapitre vient synthétiser l'étude en évaluant l'état de la vulnérabilité de la zone d'étude, par rapport aux facteurs physique, cette évaluation a été appréhendé par plusieurs auteurs, qui ont développé des outils, afin de donner un aspect quantitatif concret par des calculs d'indices de vulnérabilité côtière (IVC ou CVI), pour cela nous avons procédé comme suit :

- En premier lieu des généralités sur la thématique en question sont élaborées afin de cerner le contexte global de la vulnérabilité et son évaluation par les différents outils
- Deuxièmement, le choix d'un outil d'évaluation et de présentation de la méthodologie retenue a été fait, en déterminant des variables, avec la récolte des données et des informations nécessaires
- Dans un troisième point, une évaluation du degré de vulnérabilité par rapport à chaque variable, avec une représentation sous forme de carte a été élaborée, tout en créant une base de données à l'aide du logiciel du SIG ArcGis® 10.1
- Finalement un calcul d'indice de vulnérabilité (CVI) physique et socioéconomique, avec des statistiques d'évaluation de l'état de fragilité de la zone, ainsi que des cartes de synthèse ont été effectuées.

2 Définitions du concept de la vulnérabilité

La vulnérabilité est une fonction de facteurs conjoncturels (aléas) et structurel, déterminés par les contextes socio-économiques, culturels, fonctionnel et institutionnel d'un lieu et d'une époque. Elle peut alors être appréhendée selon quatre composantes principales : les aléas (érosion, submersion), les enjeux (valeur humaine, économique ou environnementale), les politiques et mesures de gestion (prise en charge) et la perception du risque par les sociétés exposées. (Dauphiné, 2001)

- **Les aléas**

L'aléa est défini par un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données (CETMEF, 2009) ; il peut être naturel, mais aussi d'origine humaine. Comme il doit être défini par une intensité, une occurrence spatiale et temporelle

- **Les risques**

Le risque naturel est la perte en vies humaines, en biens et en activités consécutives à la survenance d'un aléa naturel. (Marc, 2016).

- **Les enjeux**

Les enjeux sont les « personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, etc. susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel ». (MEDDTL, 2010)

- **Exposition, Resistance et Résilience d'un système côtier :**

- la **résistance** est la capacité à résister face à un événement non souhaité
- **L'exposition** est la probabilité de subir des pertes dues à un risque.
- la **résilience** est la capacité à récupérer un fonctionnement normal suite aux conséquences d'un événement non souhaité (Dauphiné, 2001)

3 L'évaluation de la vulnérabilité

L'évaluation de la vulnérabilité est un processus d'estimation, pour une zone donnée, de la probabilité d'occurrence d'un phénomène potentiellement désastreux d'une amplitude et d'une période donnée. (Marc, 2016).

3.1 Les outils d'évaluation de la vulnérabilité (L'indice de vulnérabilité)

L'indice de vulnérabilité vise à simplifier et à présenter l'information dans une forme plus facilement compréhensible et donc plus utile pour les gestionnaires.

- **L'indice de vulnérabilité côtière (CVI)**

Le CVI (Coastal Vulnerability Index) imaginé par Gornitz V. (1991) est une sorte d'une base de données constituée de plusieurs variables. Il a des limites et contraintes voire son incapacité à inclure l'aspect socio-économique, dans l'évaluation de la vulnérabilité côtière (McLaughlin, et al., 2010) Pour régler ce problème, nous pouvons utiliser l'indice CVI original avec d'autres indicateurs et intégrer des indices pour représenter d'une façon plus appropriée la complexité du système côtier,

- **L'indice de vulnérabilité côtière multi-échelle :**

McLaughlin et Cooper's (2010) ont proposé et développé ce type d'indice, dans une approche nouvelle de deux points de vue. D'une part l'indice est calculé à trois niveaux ou échelles spatiales : locale, régionale et nationale, et d'autre part un cadre est utilisé qui implique trois sous-indices (fig.34) Le problème récurrent qui se pose lors du calcul du CVI est celui de la donnée, sa disponibilité, et sa qualité. En effet les données utilisées proviennent souvent de bases de données mondiales et se caractérisent donc par une faible résolution spatiale.

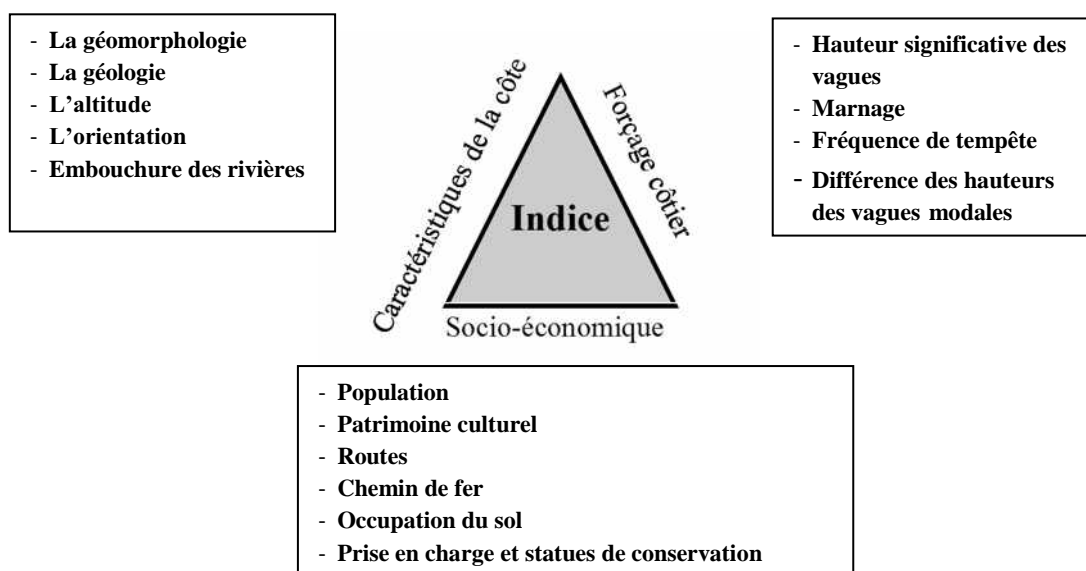


Figure 34: Présentation schématique de la méthode de CVI élaborée par McLaughlin et Cooper (2001)

4 Approche méthodologique du CVI Physique

La méthodologie est basée sur une évaluation de la vulnérabilité à partir du calcul des indices attribués à des variables physiques développées par Gornitz (1991) et améliorées par Hammar-Klose et Thieler (2001) ; ce choix de méthode est basé sur le fait que la thématique traitée s'articule autour du volet « forçage de la mer » et les facteurs physiques qui rendent (ou non) la zone d'étude vulnérable.

Avant tout calcul et analyse statistique, une présentation graphique des cellules de calcul est préalablement nécessaire, avec un choix optimal de dimensions de ces entités virtuelles. Selon Hammar-Klose et Thieler (2001).

Les dimensions de la cellule reviennent au choix de l'étude, l'auteur n'impose pas de dimension précise. Cependant Mclaughlin et Cooper (2010) imposent des dimensions en fonction de l'échelle d'étude :

- A l'échelle nationale 500*500m
- A l'échelle régionale 25*25m
- A l'échelle locale 1*1m

En suivant la méthode de Hammar-Klose et Thieler (2001) nous avons choisi des cellules de dimensions 200* 200 m (81 cellules) afin de mieux illustrer la vulnérabilité de notre zone d'étude par rapport aux facteurs physiques.

4.1 Choix des variables pour le CVI_{physique} et acquisition des données

Afin de développer une base de données pour une évaluation, à une petite échelle, de la vulnérabilité côtière, des données pertinentes ont été recueillies auprès des fournisseurs des informations géographiques locales et internationales.

Les variables physiques retenues pour le calcul d'indice de vulnérabilité de notre zone d'étude sont représentées dans le tableau (tab.6)

Tableau 6: Présentation des variables retenues pour le calcul du CVI physique

Variable	Catégorie				
	1	2	3	4	5
Géomorphologie	Côte rocheuse à falaise haute	Côte à Falaise moyenne	Côte à falaise basse	Lagune	côtes deltaïques, marais, cordon
Trait de côte (m/an)	> 2.0	1.0 - 2.0	-1.0 - 1	-2.0 - -1.0	< -2.0
La pente (%)	12	12 - 9	9 - 6	6 - 3	< 3
Le niveau de la mer (mm/an)	< 1.8	1.8 - 2.5	2.5 - 3.0	3.0 - 3.4	> 3.4
Hauteur des vagues (mm)	< 0.55	0.55 - 0.8	0.85 - 1.05	1.05 - 1.025	> 1.25
Le marnage (m)	> 6.0	4.0 - 6.0	2.0 - 4.0	1.0 - 2.0	< 1.0
CVI	Très faible	Faible	Modéré	Fort	Très fort

- **Variable géomorphologie**

Comme il est décrit ci-dessus, chaque variable est affectée à une valeur de risque relatif en fonction de l'ampleur potentielle de sa contribution à des changements physiques sur la côte. Les données qui nous ont permis d'analyser le degré de vulnérabilité par rapport à cette variable sont tirées d'un MNT de la zone d'étude à une échelle de 1/30000 fourni par l'institut des études géographiques des Etats unis L'USGS ainsi que les sorties sur terrain et les images satellitaires de Google Earth 2015 qui nous ont permis d'avoir un aperçu géomorphologique. Après avoir une carte topographique à l'aide d'un traitement intégré dans le logiciel ArcGis® 10.1(fig.35).

- Secteur ouest : il s'étend de cap Matifou jusqu'à la limite ouest de Ain Taya, caractérisé par une géomorphologie de type falaise de hauteur allant de 10 à 20m, cette parcelle de la côte est considérée comme étant rocheuse sur la totalité de son étendu. Ce qui lui donne un caractère très peu vulnérable voire un faible degré.
- Secteur centre : il comprend toute la côte de Heraoua, Ain taya jusqu'à Surcouf, dont la topographie ne dépasse pas les hauteurs de 10m en présence de falaises basses, des accumulations dunaires et des de dépôts quaternaires, ce secteur est plus vulnérable par rapport au premier avec un degré moyen.
- Le secteur est : le plus vulnérable de point de vue géomorphologique, caractérisé par des accumulations dunaires et de plages rectilignes, la topographie est comprise entre 0 et 5m ce qui lui affecte le degré de vulnérabilité très fort.

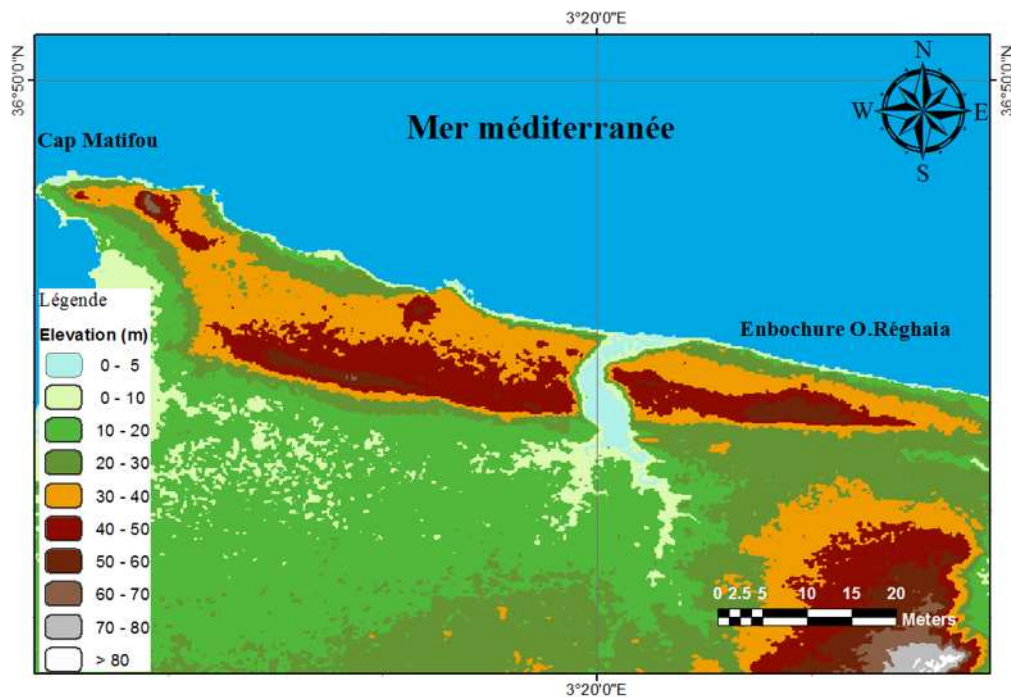


Figure 35: Carte topographique de la zone d'étude élaboré par un MNT 1/30000

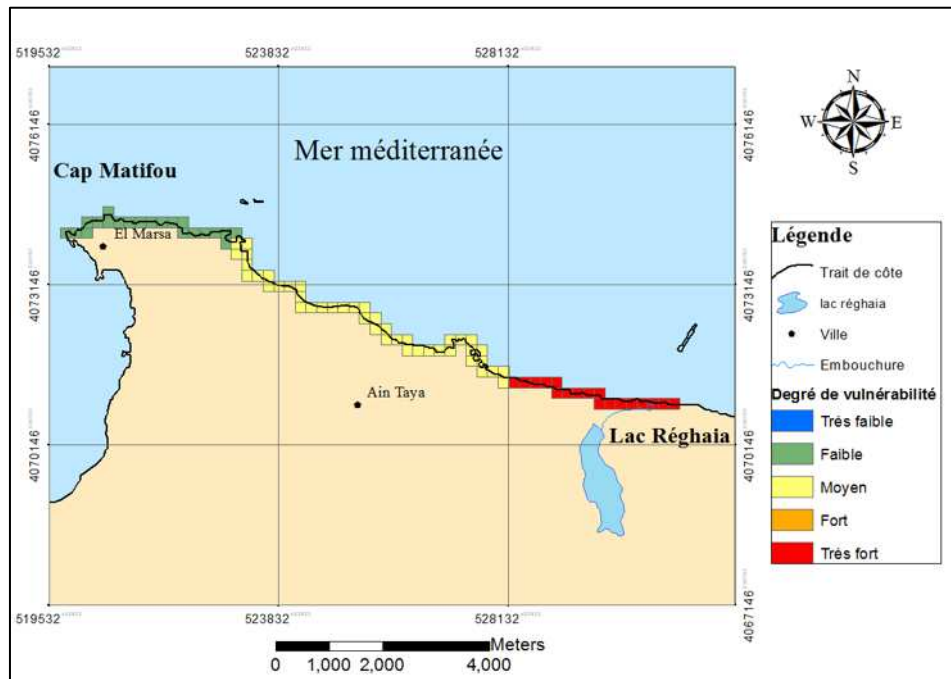


Figure 36: Présentation des degrés de vulnérabilité par rapport à la variable géomorphologie

- **La variable trait de côte**

Le suivi du trait de côte a été abordé dans le chapitre I où les taux d'érosion/accrétion par an ont été calculés par la mesure de variation de la ligne de rivage durant une période de 57 ans jusqu'à l'année 2016.

Les résultats sont présentés sous forme de graphe (fig.37), des codes par ordre de niveaux de degré de vulnérabilité en fonction du taux de recul/an leurs ont été affectés afin de représenter, sous forme de carte, les différentes classes de la vulnérabilité estimée pour cette variable.

Par rapport aux intervalles de classes élaborées par Hammar-Klose et Thieler (2001) la zone d'étude a une tendance de vulnérabilité moyenne par rapport à l'érosion. En effet, la plupart des taux nets de variation du trait de côte par an enregistrés au niveau des transects, sont compris entre 1 et -1 m/an avec des zones à fort degré de vulnérabilité, à savoir la plage Surcouf et des zones à faible degré de vulnérabilité qui se situent à l'extrême est de notre zone d'étude (Réghaia-plage)

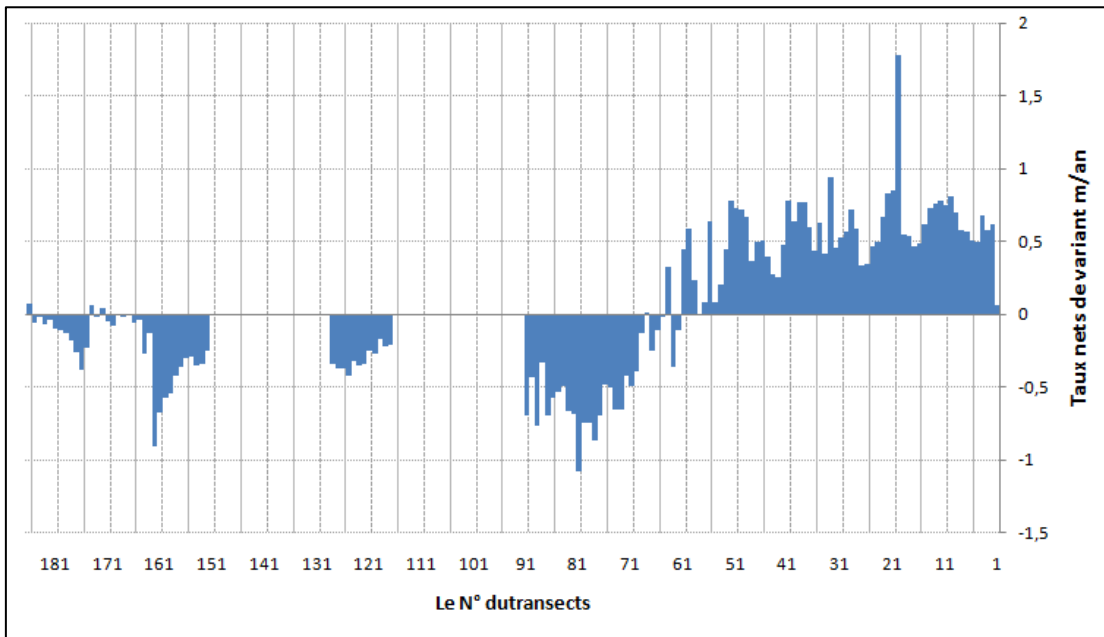


Figure 37: Représentation graphique des taux nets de variation du trait côte de la zone d'étude

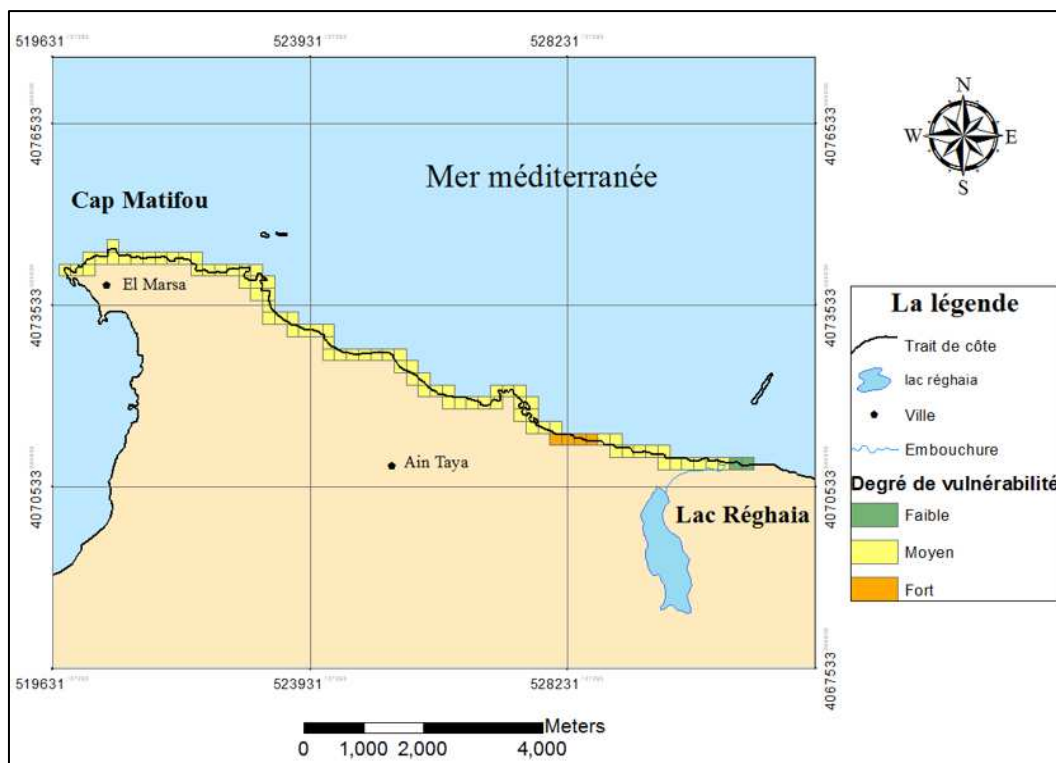


Figure 38: représentation des degrés de vulnérabilité par rapport à la variable trait de côte

c. La variable pente

La pente régionale permet une évaluation non seulement le risque relatif d'inondation, mais aussi la rapidité potentielle dureculdu rivage, car à faible pente la côte devrait reculer plus vite que les côtes à pente plus raides (Pilkey, *et al.*, 2014).

La pente régionale de la zone côtière a été calculée à partir d'une grille d'élévations topographiques, élaborée par le traitement du MNT de la zone d'étude avec la grille bathymétrique dont les données numériques sont extraites de la carte marine établie par le Service Hydrographique des Forces Navales (SHFN).

Ces données sont ensuite traitées à l'aide du logiciel SIG, ArcGis® 10.1 qui intègre dans son ArcToolbox, un module de traitement des données des modèles numériques de terrain pour calculer la pente de la plaine côtière subaérienne par une méthode d'interpolation. (fig.57)

La représentation du degré de vulnérabilité par rapport à la variable pente, se concorde avec celle de la variable géomorphologie, qui révèle trois classes d'intensité (faible, moyenne, et forte) (fig.59)

- Le secteur ouest : caractérisé par des hautes falaises, ce secteur a des dénivellations de pente comprises entre 12 et 9% ce qui lui affecte un degré de vulnérabilité faible
- Le secteur centre : les pentes locales marquent une dénivellation maximale de 8.6% avec une classe de degré de vulnérabilité moyen
- Le secteur est : un degré de vulnérabilité fort, avec des pentes de 0 à 3%.

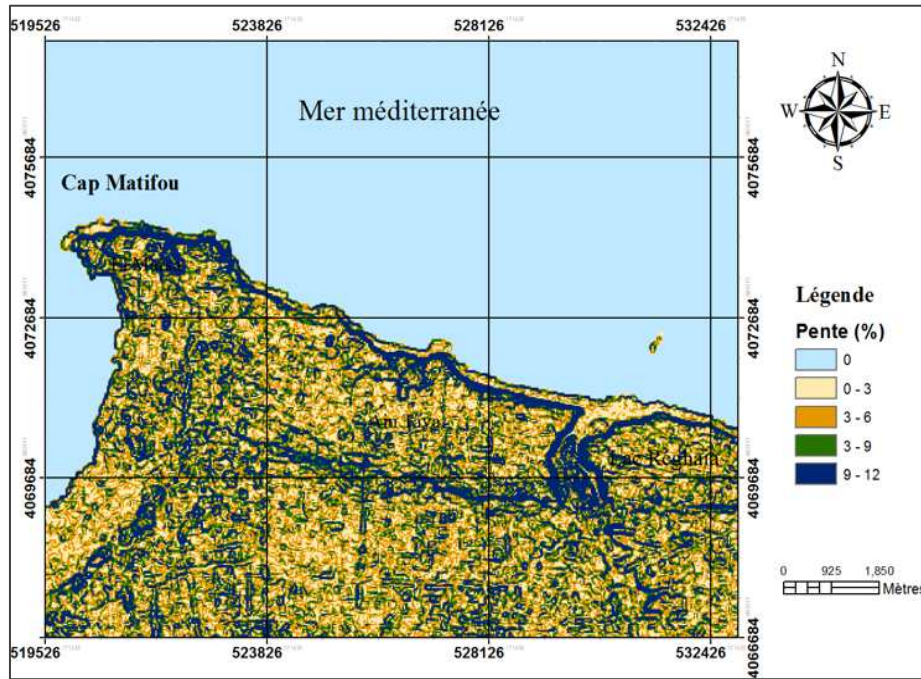


Figure 39: Carte représentative de la dénivellation des pentes (%) dans zone d'étude

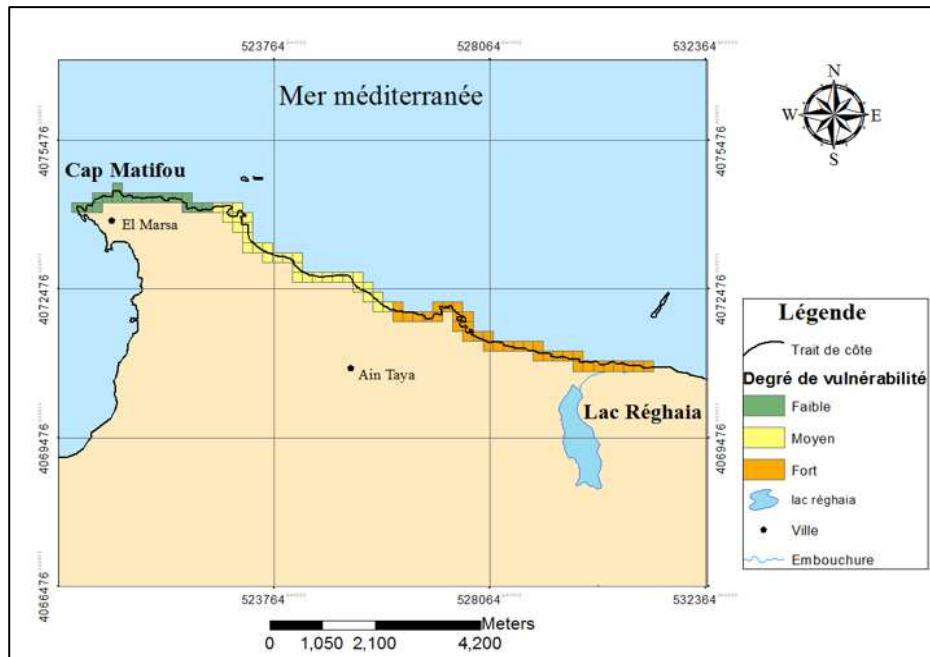


Figure 40: Représentation des degrés de vulnérabilité par rapport à la variable pente

- **La variable relative au changement du niveau de la mer**

L'un des effets des changements climatique, est l'élévation du niveau de la mer. Il est en particulier noté qu'à l'échelle mondiale, le niveau moyen de la mer s'est élevé au rythme de 0,5 mm/an sur les derniers 3000 ans. En effet sur la période 1900-2009 ce rythme s'est accéléré pour atteindre 1,7 +/-0,2 mm/an, et 3,2 +/-0,4 mm/an sur 1993-2011. (Jouzel, et al., 2012), La méditerranée n'est pas à l'abri de cette tendance mondiale. Une augmentation de 7 à 12 cm du niveau général de la mer Méditerranée, par rapport aux décennies précédentes, est prévue d'ici 2050 (Gualdi, et al., 2013) et des hausses plus importantes sont prévues sur les côtes est et sud de la Méditerranée. (GIEC, 2015)

Des études se sont appuyés sur des données marégraphiques issues de stations disposées le long de la côte méditerranéenne ces séries marégraphiques indiquent un taux d'élévation actuel compris entre $-1,5 \pm 0,4$ mm/an et $-0,3 \pm 0,3$ mm/an (Jouzel, et al., 2012) en comparant ces taux avec les intervalles menés par Hammar *et al*, nous affectons un degré de vulnérabilité très faible par rapport à la variable élévation du niveau de la mer (fig.42)

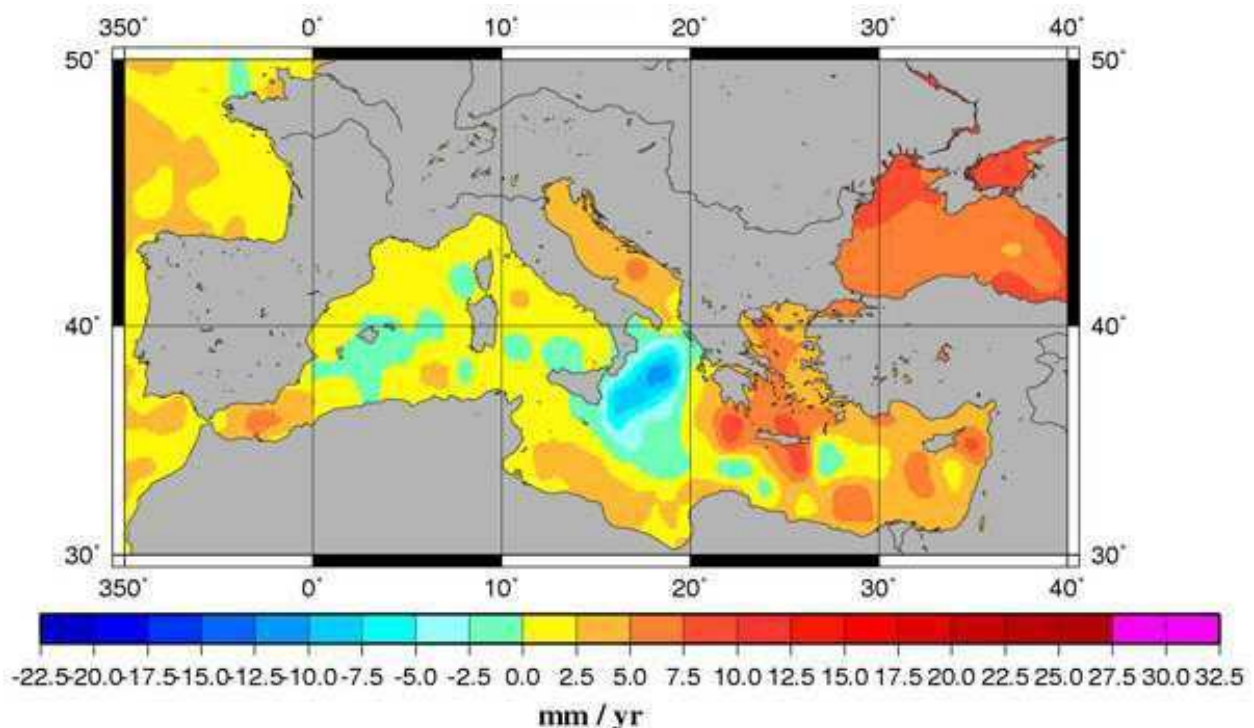


Figure 41: Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer entre 1993 et 2011, (Planton, *et al.*, 2012)

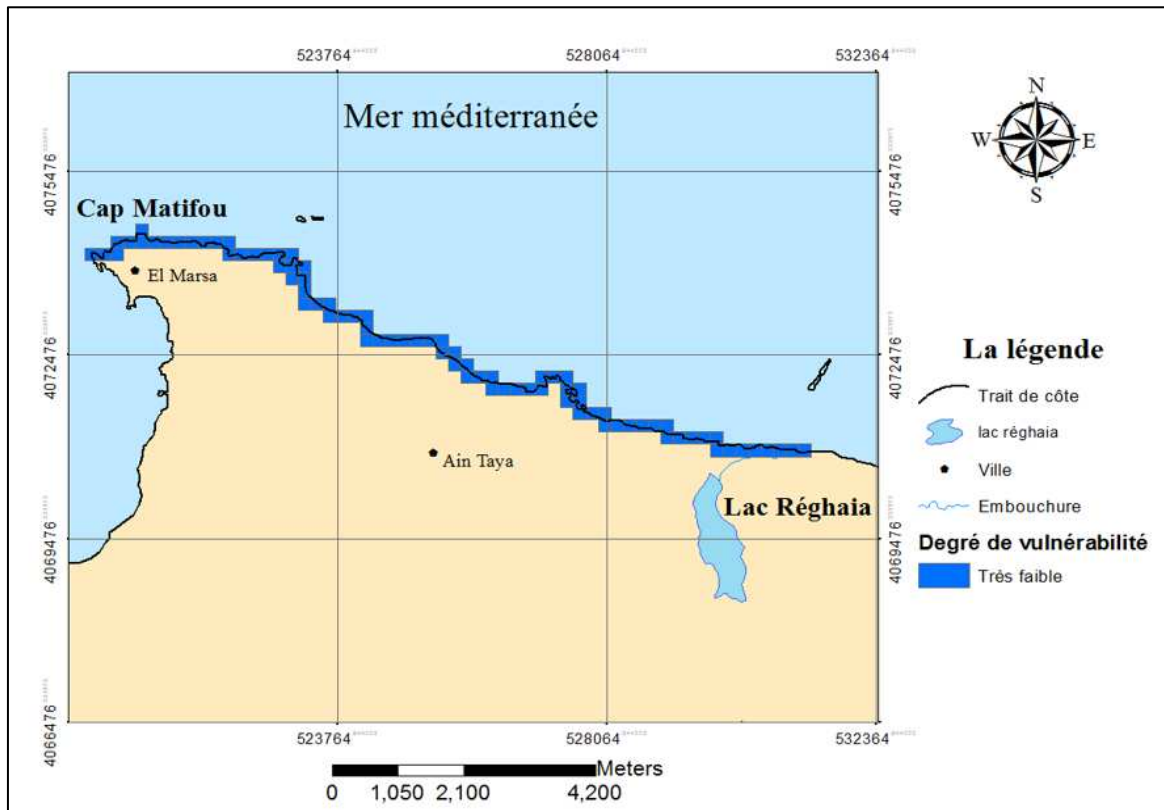


Figure 42: Représentation des degrés de vulnérabilité par rapport à la variable élévation du niveau de la mer

- **Variable relative à la hauteur significative des vagues à la côte (Hs)**

La hauteur des vagues est considérée comme un indicateur énergétique, qui entraîne le budget sédimentaire, en mobilisant et transportant les matériaux des plages, nous avons simulé les hauteurs significatives des vagues à la côte lors du troisième chapitre qui a fait l'objet de la modélisation numérique du fonctionnement hydro-sédimentaire,

Le résultat retenu lors de l'évolution du degré de la vulnérabilité par rapport à la variable « hauteurs significatives », est celui des hauteurs à la côte (Hs) provoquées par les houles de provenance nord-est N45°, qui sont les houles les plus défavorables, enregistrées lors des tempêtes (fig.43) ces hauteurs sont comparées à la grille de cotation élaborée par Hammar-Klose et Thieler (2001) , pour parvenir à une classification en fonction du degré de vulnérabilité par rapport aux Hs à la côte.

La figure 63 révèle des différentes classes de degré de vulnérabilité lié à la variable Hs à la côte, d'un aperçu nous constatons que :

- Le secteur ouest d'El-Marsa jusqu'aux Flots-bleus le degré de vulnérabilité lié aux hauteurs significatives à la côte est considéré comme étant très fort
- Au niveau des pointes et des ouvrages de protection les Hs à la côte marquent un très faible degré de vulnérabilité
- Le secteur est enregistré une variété de degré de vulnérabilité, très faible au niveau de la plage Réghaia et une intensité moyenne au niveau des plages El-Kadous et Surcouf

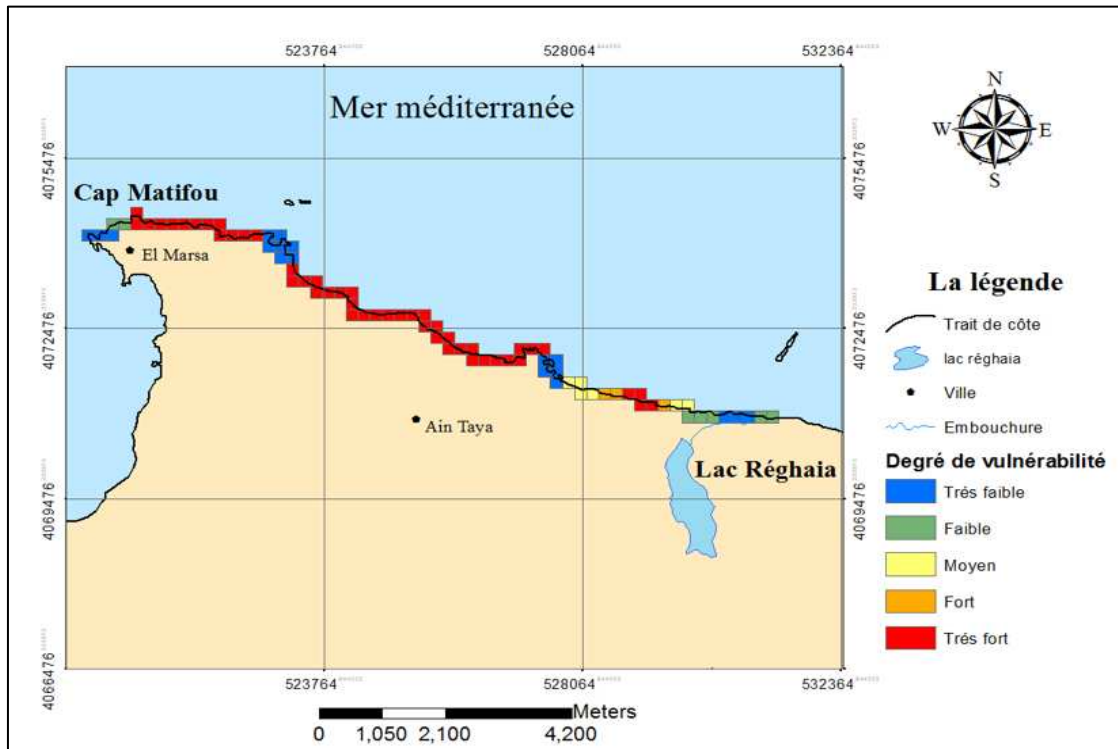


Figure 43: Présentation des hauteurs significatives des houles de provenance N45°

• **La variable marnage**

Les zones macrotidales sont moins vulnérables que ceux qui ont un régime microtidal, ces dernières ont un estran étroit ce qui provoque une forte érosion et une submersion au cas de coïncidence entre une marée hautes et des forte agitations marine. En outre, une haute amplitude des marées est généralement associée à un large estran dans lequel l'énergie des vagues peut être dissipée (Gornitz, 1991). La côte algéroise est classée comme étant une côte microtidale ce qui la rend très vulnérable par rapport au marnage. (fig.44)

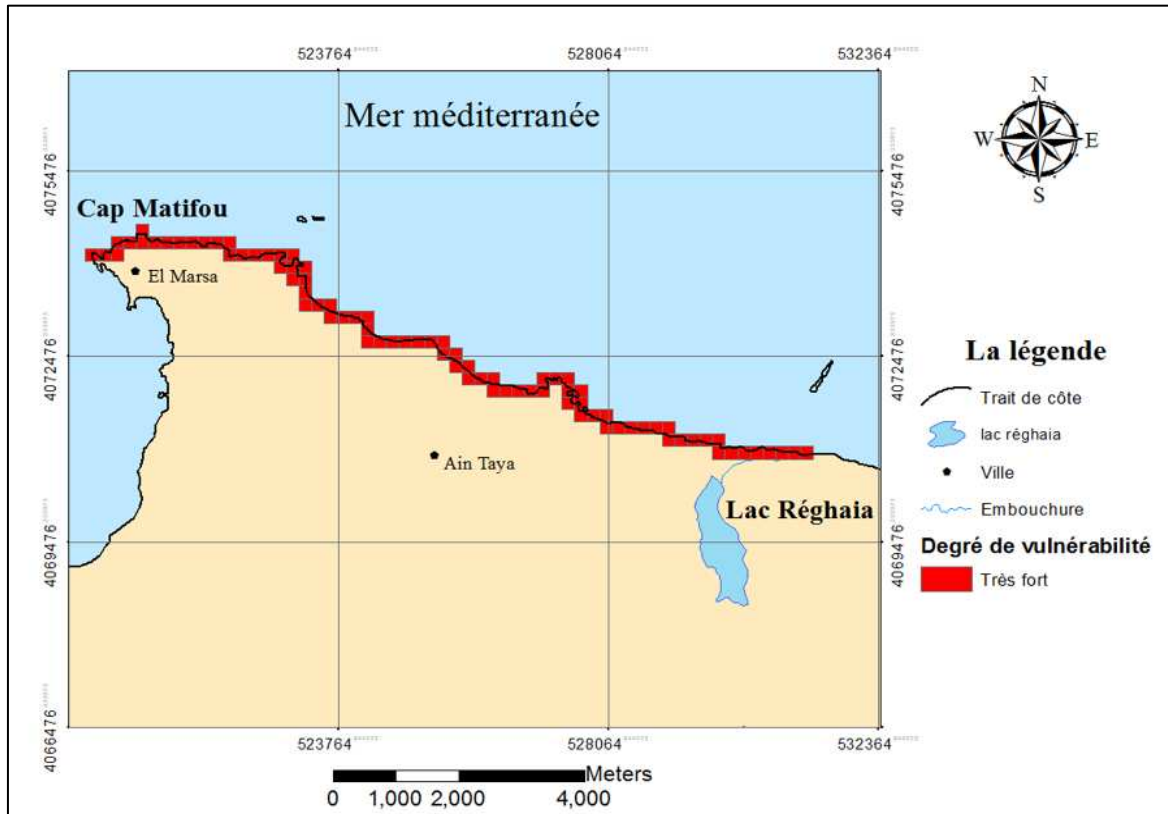


Figure 44: Représentation des degrés de vulnérabilité par rapport à la variable marnage

5 Calcul d'indice de vulnérabilité côtière CVI physique

Après avoir affecté des cotations de 1 à 5 pour chaque section (cellule) de la côte et évalué l'intensité de vulnérabilité pour les 6 variables physiques, l'étape suivante consiste à calculer la valeur numérique unique qui définit la vulnérabilité de chaque section par la formule de Gornitz (Marc, 2016) :

$$CVI = \sqrt[2]{\frac{a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f}{6}}$$

a = géomorphologie;

b = Taux de changement de la côte;

c = pente

d = élévation relative du niveau de la mer ;

e = hauteur moyenne des vagues;

f = moyenne de la marée

Les valeurs de CVI obtenues varient entre 3 et 18.7 le long de la côte d'étude, un traitement statistique a été élaboré afin d'évaluer l'état global de vulnérabilité globale de la zone d'étude par rapport aux facteurs physiques.

Les CVI calculés sont classés dans des intervalles égaux, afin de leur donner des niveaux de vulnérabilité. Les résultats du traitement statistique sont représentés sous forme de tableaux, graphes et cartes afin d'illustrer au mieux la vulnérabilité côtière de la zone d'étude. Le tableau (tab.7) montre les différentes classes de CVI, leurs intensités de vulnérabilité, ainsi que leurs étendues en linéaire côtier (Km)

Tableau 7: Présentation des résultats du traitement statistique, du CVI physique.

CVI	Intensité de la vulnérabilité	Effectif	Linéaire côtier (km)	Pourcentage du linéaire côtier (%)
0 - 7	Faible	16	3.2	20
7 - 11	Modérée	48	9.6	60
11 - 15	Forte	11	2.2	13.75
15 - 19	Très forte	6	1.2	7.5

La côte étudiée s'étend sur une longueur de 16km, dont 60% soit 9.6Km de linéaire, est caractérisé par une intensité de vulnérabilité modérée. La carte de synthèse de la vulnérabilité côtière de la zone Est algéroise (fig.45) révèle que cette intensité caractérise surtout le secteur centre de Tamaris à l'est jusqu'au Zerkouria à l'ouest.

Cependant, 7.5% du linéaire côtier présente un très fort degré de vulnérabilité.

Le secteur KafelArar, Flots-bleu, Décaplage et Tarfaya caractérisé par son importance de point de vue présence de plage de forte attraction touristique, connaît un fort degré de vulnérabilité, il correspond à 13.57% de la côte étudiée.

Les secteurs qui enregistrent un faible CVI, (environ 20% du linéaire côtier), se situent dans les extrémités est et ouest de la zone d'étude, notamment la plage Réghaia, et le secteur de Zerzouria jusqu'au Cap Matifou (ElMarsa)

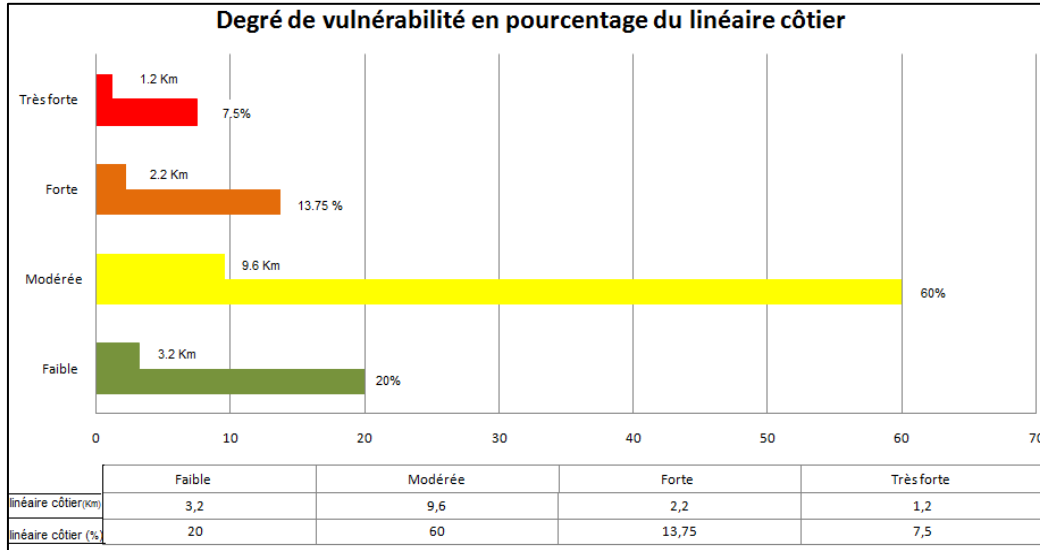


Figure 46: Présentation graphique du degré de vulnérabilité en termes de pourcentage du linéaire côtier

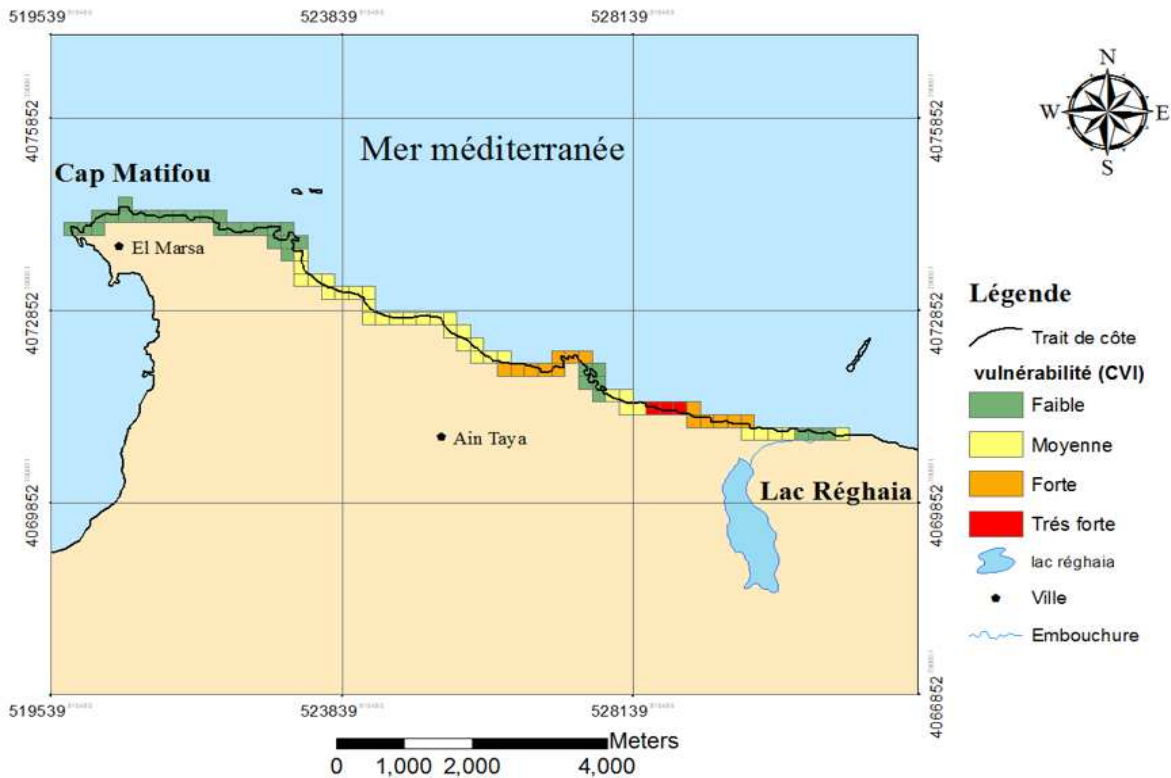


Figure 45: Carte de synthèse représentant le CVI de la zone Est algéroise

6 Approche méthodologique du CVI socio-économique

McLaughlin et Cooper (2010) ont intégré un indice de vulnérabilité lié aux facteurs socio-économiques dans leur méthode de CVI multi-échelle. Nous avons pris en considération ce volet afin d'apporter un élément pertinent à l'évaluation de l'état globale de la vulnérabilité de la zone Est algéroise.

La méthode proposée par McLaughlin et Cooper (2001) impose 3 échelles de calcul d'où l'appellation multi-échelles. Dans notre étude, l'échelle nationale a été prise en considération avec des dimensions des secteurs (cellules) d'ordre 500*500m, Ce choix a été en fonction de la disponibilité des données et le besoin de l'étude.

6.1 Choix des variables pour le CVI socio-économique

Les variables retenues (tab.8) sont codées de 1 à 5 selon leur niveau, ces codes ont été additionnés au sein du système SIG ArcGis® 10.1, et les résultats ont ensuite fait objet d'un traitement statistique.

Tableau 8: Représentation des variables retenues pour le calcul du CVI socio-économique

Socio-économique	1	2	3	4	5
Agglomération	Absente	Village	Petite ville	Ville	Grande ville
Réseau routier	Absent		Route		Autoroute
Chemin de fer	Absent				Présent
Occupation du sol	Les plans d'eau Espace vert roches nues	Prairie naturel	Forêt	Activité agricole	Zone urbanistique, d'infrastructure et industriel
Héritage culturel	Présent				Absent
Statut de protection	Absent		International		National

a. La variable agglomération

Notre zone d'étude comprend trois entités administratives à savoir, Réghia, Ain Taya et El Marsa, (fig.47)

La population, ainsi que la densité, révèlent que ces trois communes sont considérées comme des agglomérations importantes en perpétuel développement démographique (tab.9).

Tableau 9: Population des trois communes dans la zone d'étude (Ministère de l'Aménagement du Territoire, 2008)

	Population	Densité (Habitant/m²)
Ain Taya	33581.53	3462.01
El Marsa	11939.89	3063.12
Réghaia	23550.26	3022.36

Pour classer ces agglomérations, il faut faire appel à l'échelle retenue pour l'évaluation, (l'échelle nationale), de ce fait, il est recommandé de se baser sur les lois et les normes qui régulent l'aménagement du territoire en Algérie., La loi n° 06-06 portant sur la loi d'orientation de la ville, définit une ville comme une agglomération urbaine ayant une taille de population et disposant de fonctions administratives, économiques, sociales et culturelles, le classement en, petite ville, ville moyenne, et grande ville se fait selon les critères démographiques notamment la population. Faisant partie d'une future métropole comme Alger, les villes d'Ain Taya, Réghaia et ElMarsa, ont eu le degré 5 correspondant à un niveau très fort de vulnérabilité lors de notre évaluation.

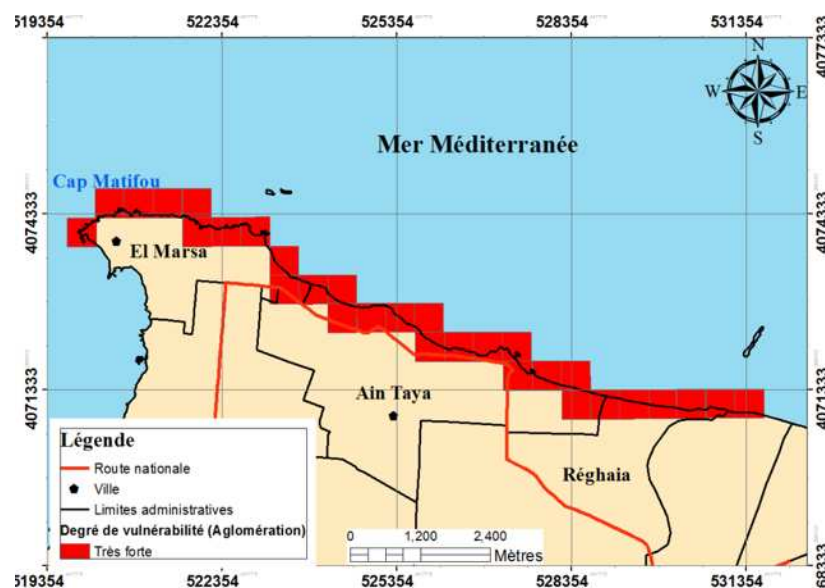


Figure 47: Représentation du degré de la vulnérabilité liée à la variable, agglomération

b. variable chemin de fer

Le réseau de chemin de fer de la zone d'étude a été téléchargé, sous un format Shapfile(.shp) exploitable par le logiciel du SIG, à partir de la base de donnée géo-spatiale Open Street Map®. La zone côtière Est algéroise, qui se situe entre cap Matifou et oued Réghaia, n'a aucune ligne de chemin de fer, cela lui confère un degré de vulnérabilité très faible. (fig.48)

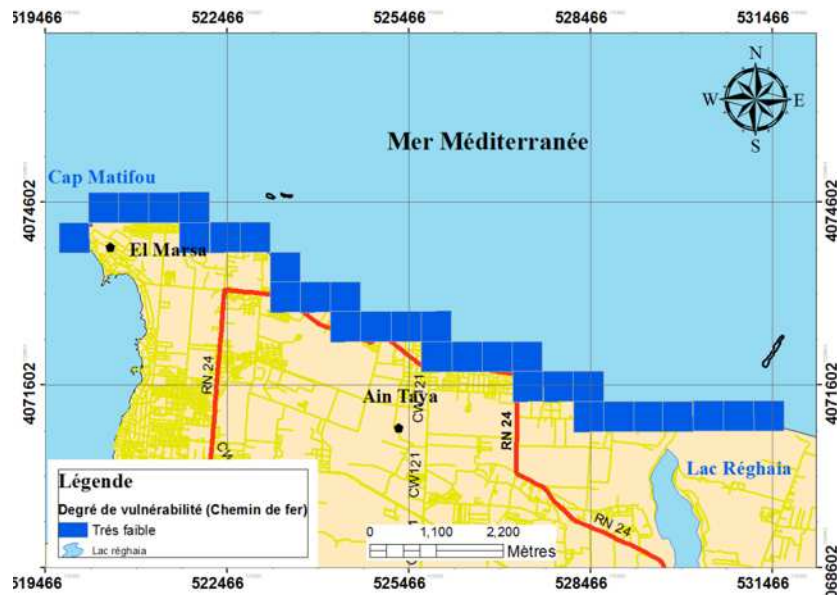


Figure 48: représentation du degré de la vulnérabilité liée à la variable, chemin de fer

c. Variable réseau routier

Le réseau routier de la zone Est algéroise quant à lui a été obtenu, à partir la base de données géo-spatiales Open Street Map®,

Le traitement de ces données par le logiciel ArcGis® 10.1 a révélé que sur une étendu de 2km loin du trait de côte, les types de chemin qui existent sont, plutôt des routes communales ainsi qu'une route nationale n°24. Cela nous a permis de constater que la zone est soumise à un degré de vulnérabilité moyen par rapport à cette variable. (fig.49)

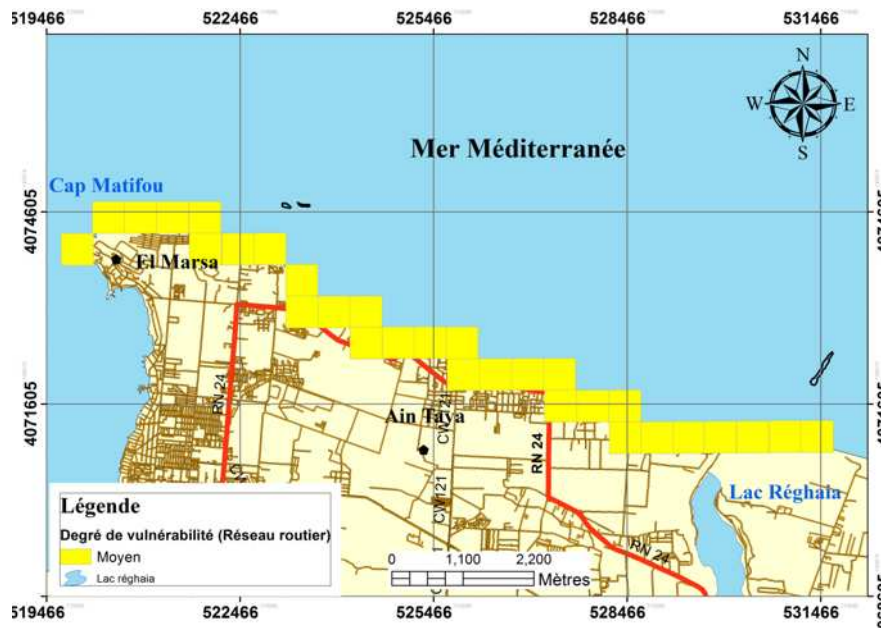


Figure 49: représentation du degré de la vulnérabilité liée à la variable, réseau routier

d. Variable occupation du sol

Le territoire littoral Est algérois, est soumis à une pression démographique considérable, il doit faire face à une artificialisation accrue des espaces engendrés par le développement des infrastructures de services de loisirs, d’hébergement, de restauration, et, plus globalement, d’équipements.

De ce fait, une double analyse a été effectuée ; la première est une analyse d’une image satellitaire (Landsat) fournit par l’USGS, et traité par le logiciel ENVI® afin de faire sortir le degré d’artificialisation du sol. (fig.50). la deuxième est une analyse des informations géo-spatiales fournissées par la base de données en ligne Open Street Map®

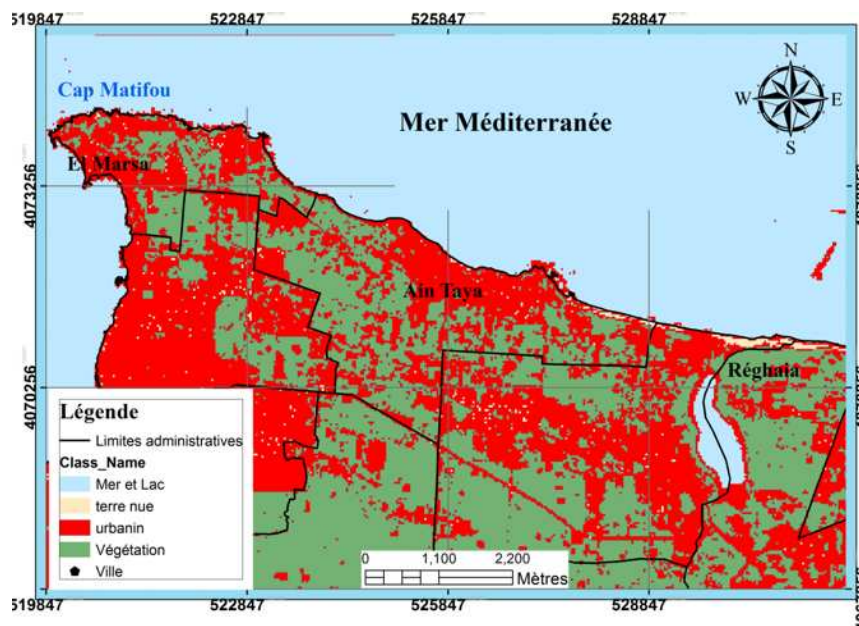


Figure 50: Représentation de l’occupation du sol à partir d’un traitement d’une image satellitaire

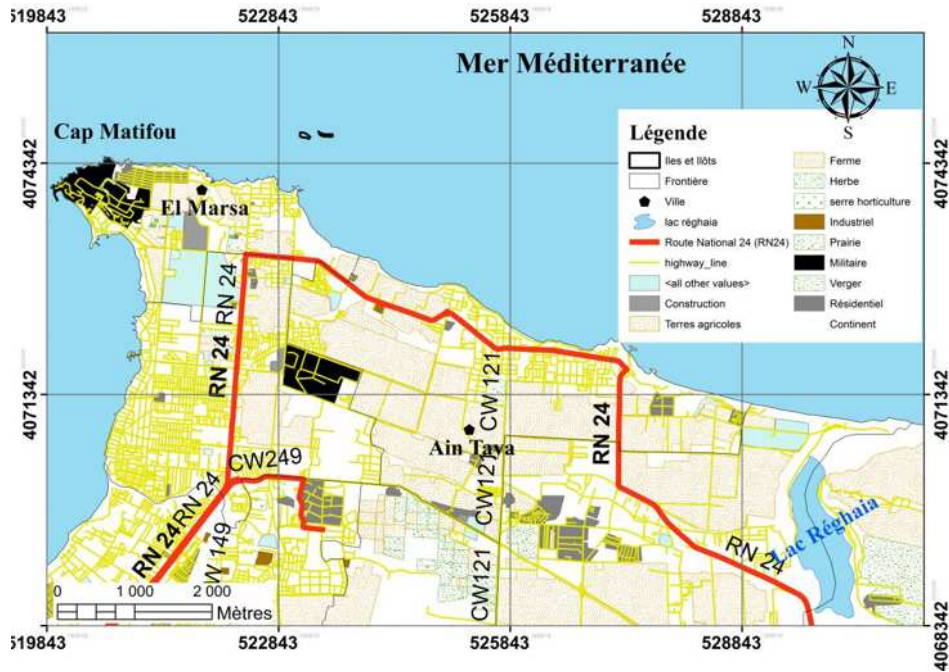


Figure 51: Représentation du cadastre et le type d’occupation des sols de la zone d’étude

L’analyse globale a révélé que notre zone d’étude est fortement urbanisée par au niveau de certaines zones, notamment dans sa partie ouest (ElMarsa) et le centre de Ain Taya, nous notons la présence de lourdes d’infrastructures telles que le centre d’armée à El Marsa, ce qui fait que la vulnérabilité soit de très fort degré. L’activité agricole, quant à elle, est présente surtout au niveau de Réghaia et à l’ouest d’Ain Taya,

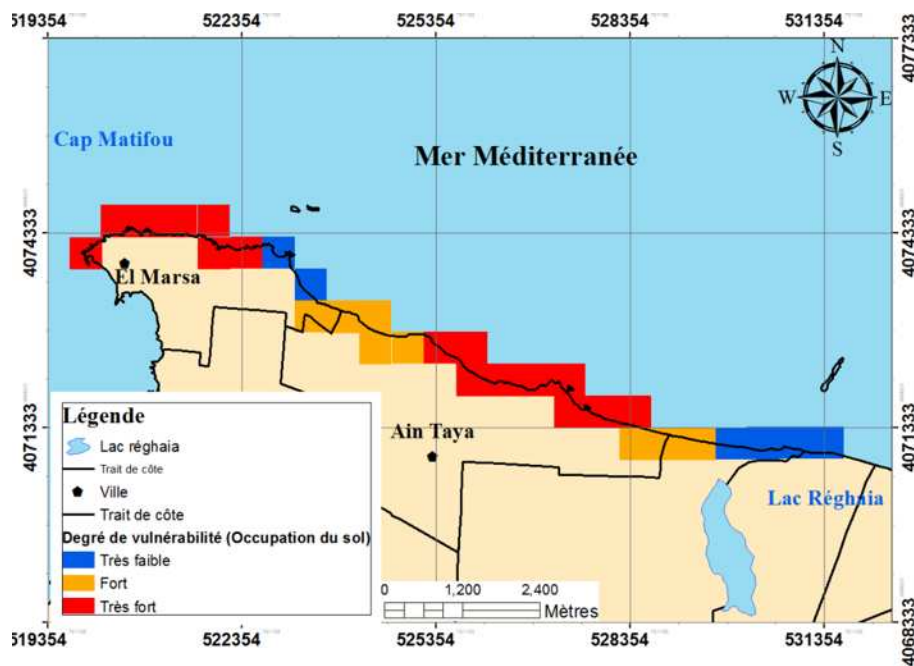


Figure 52: représentation du degré de la vulnérabilité liée à la variable, occupation du sol.

Héritage culturel

La zone d'étude présente un héritage culturel au niveau de son extrême ouest, plus précisément la ville ElMarsa, cette dernière possède un patrimoine historique très importants, notamment son fort datant du XVII^e siècle "Bordj de Tamentfoust", ainsi que des tronçons de colonnes de marbre et des mosaïques attestant de l'existence d'édifices considérables. Outre, les vestiges de la basilique chrétienne, datant du IV^e siècle qui ont été dégagés les ruines de thermes et d'un cirque. (Fig.53)



Figure 53: les ruines de la basilique à Tamentfoust(Source : internet).

De ce fait la partie ouest de la zone d'étude est considéré comme étant très vulnérable avec un degré de 5, tandis que le reste de la zone ne présente aucun patrimoine culturel, ce qui la rend faiblement vulnérable par rapport à cette variable. (fig.54)

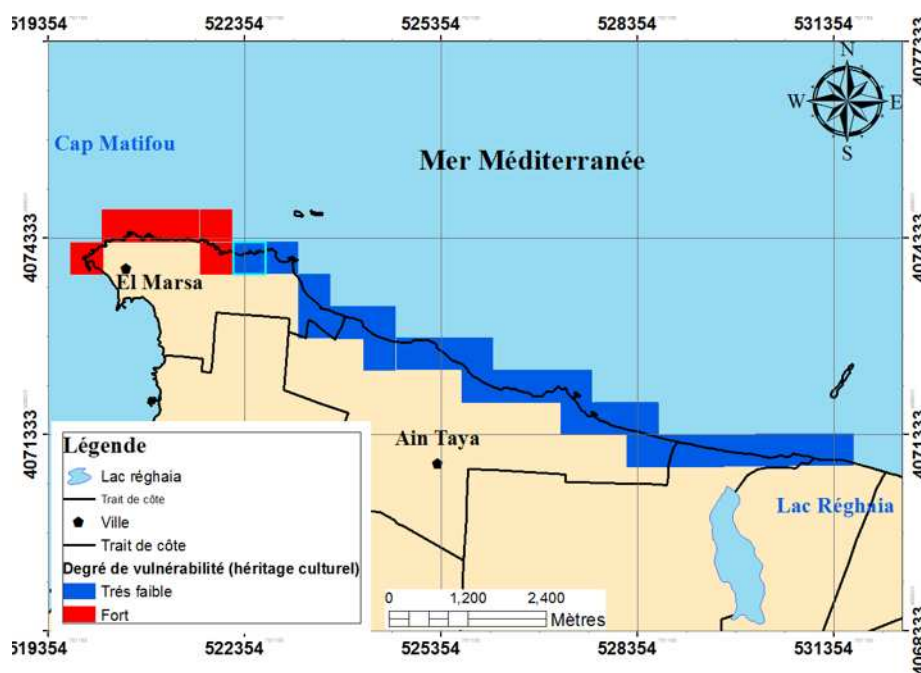


Figure 54: Représentation du degré de la vulnérabilité liée à la variable, patrimoine naturel

- **Statut de protection**

Le littoral Est algérois, présente une zone dite «le lac de Réghaia » qui est un site d'importance écologique de dimension internationale protégé par RAMSAR. (Larid, 2008) C'est un milieu lacustre et marécageux, entouré d'une ceinture boisée et en retrait d'un linéaire côtier sableux qui s'ouvre sur des petits fonds marins remarquables.

Eu égard aux pressions anthropiques qu'elle subit, pour cause principalement de son insertion dans l'aire métropolitaine Algéroise, son équilibre est de plus en plus menacé.

Au courant de l'année 2004, les pouvoirs publics ont engagé une réflexion pour une stratégie en vue de l'élaboration d'un plan de sauvegarde. Ceci démontre tout l'intérêt qui lui est accordé. (Challal, et al., 2005)

La présence d'un site protégé au niveau international comme la zone humide de Réghaia, rend l'extrême est de la zone d'étude vulnérable au troisième degré. (fig.55)

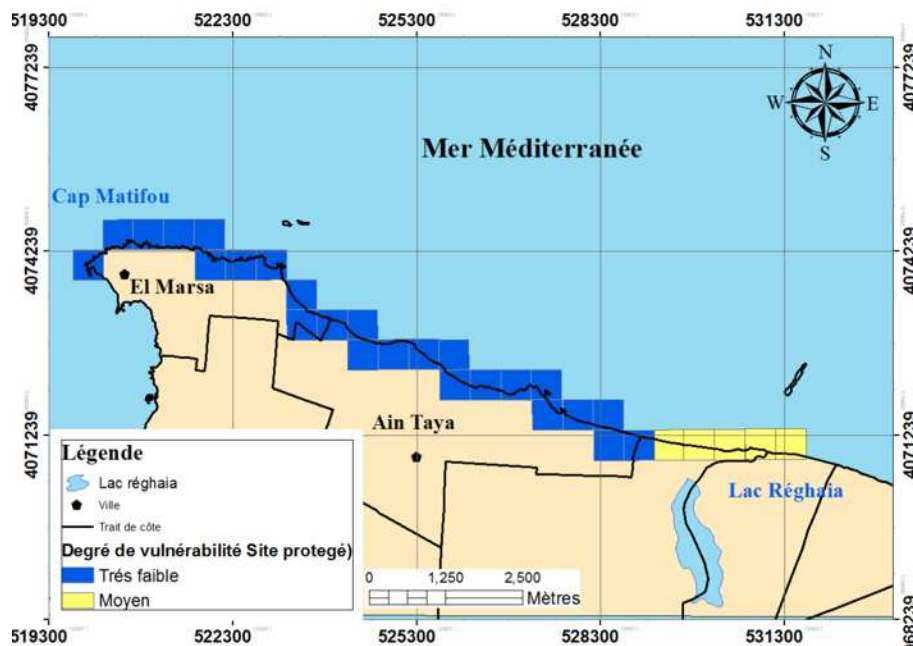


Figure 55: Représentation du degré de la vulnérabilité liée à la variable, statut de protection

7 Calcul de l'indice de vulnérabilité CVI socio-économique

McLaughlin et Cooper ont développé une formule de pondération spécifiquement adoptée pour intégrer le volet socio-économique, et les autres sous indices à savoir : les caractéristiques de la côte et le forçage côtier, afin d'avoir un seul indice. Notre but ne

s'intègre pas dans ce contexte, pour cela l'équation de calcul du CVI socio-économique, retenu, est la même que celle du CVI physique, .

Le CVI socio-économique calculé a été classé selon des intervalles et représenté graphiquement, cette représentation renseigne sur l'intensité et l'étendue de la vulnérabilité côtière de notre zone, d'après le graphe (fig.56), 43.75% du linéaire côtier de l'Est algérois est caractérisé par une vulnérabilité liée aux facteurs socio-économiques d'une faible intensité.

La carte (fig.57) montre que

- le secteur extrême ouest d'ElMarsa et celui de surcouf, sont ceux qui subissent les plus fortes pressions, avec un degré de vulnérabilité très fort, sur un linéaire côtier de 4.5Km,
- outre, une vulnérabilité moyenne est enregistrée sur 28.12% de la côte.
- La plus grande partie du linéaire côtier est faiblement vulnérable

Tableau 10: Présentation des résultats du traitement statistique du CVI socio-économique.

CVI	Intensité	Effectifs	Linéaire de côte (km)	Linéaire de côte %
0 - 2	Faible	14	7	43.75
2 - 4	Moyen	9	4.5	28.125
4 - 6	Fort	0	0	0
6 - 8	Trèsfort	9	4.5	28.125

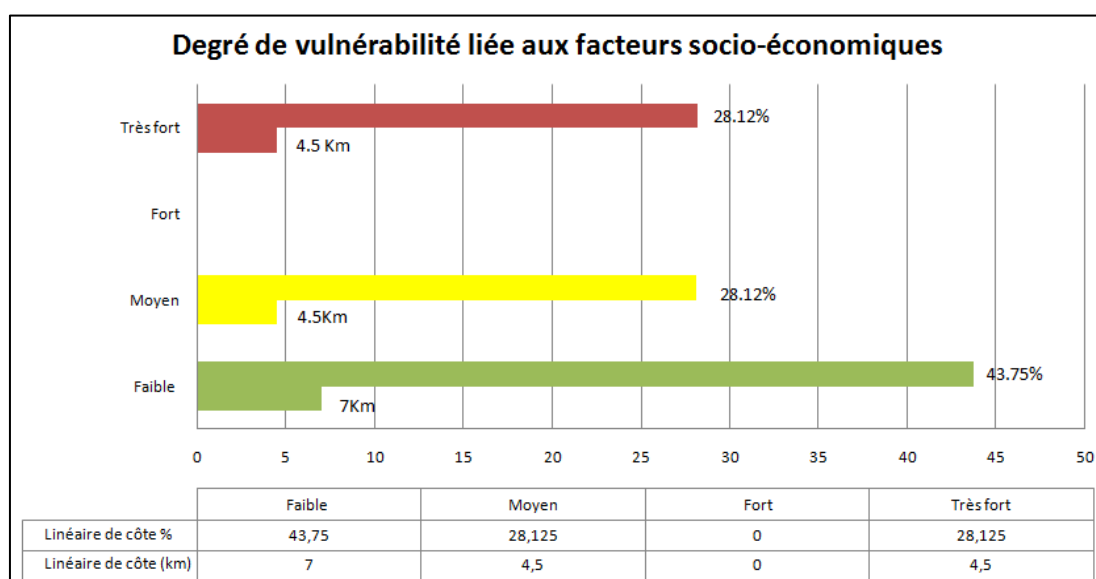


Figure 56: Représentation graphique du niveau de vulnérabilité en terme de pourcentage du linéaire côtier

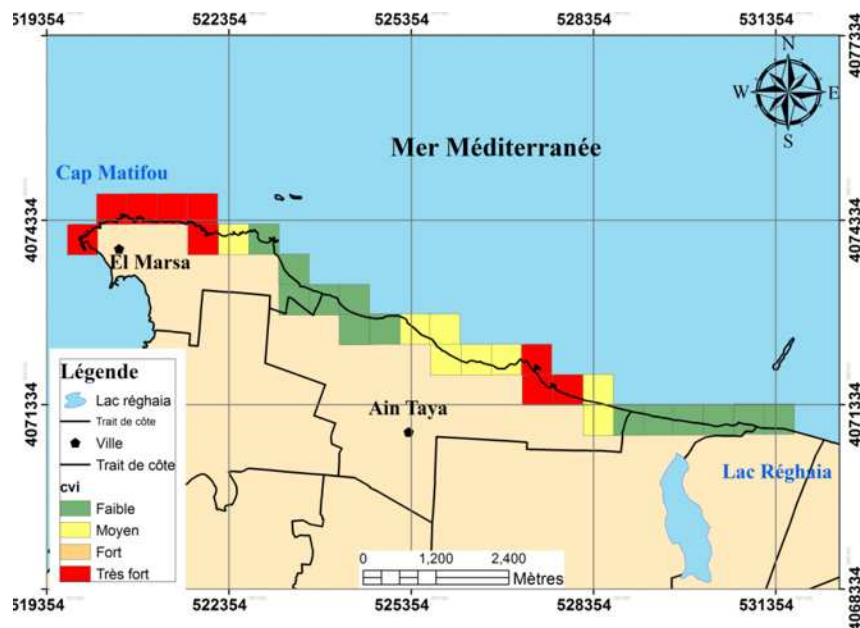


Figure 57: Carte de synthèse représentant le CVI socio-économique de la zone Est-algéroise

8 Conclusion

De point de vue global, la zone d'étude est soumise à des facteurs de forçage naturel et des caractéristiques qui la rendent moyennement vulnérable, avec des fluctuations d'intensité locales. A noter que la zone n'est pas soumise qu'aux pressions du forçage côtier ou les facteurs physique sont les mieux abordé dans ce chapitre, mais aussi aux facteurs socio-économique, qui doivent être pris en considération, afin de donner un élément de réponse concret qui fait l'objet de l'évaluation de l'état de notre zone d'étude. Le volet socio-économique a révélé une Faible pression généralisé sur la plus grande partie de la zone, n'empêche que de très fortes intensités de vulnérabilité ont été enregistrées surtout au niveau de la commune d'ElMarsa. Les cartes élaborées ainsi que les statistiques et les calculs basés sur une méthode d'évaluation de la vulnérabilité, celle qui est proposée par Gornitz et *al* 1991 et améliorée par Hammar et *al* 2001, et qui semble la mieux adéquate pour notre étude, permettent de donner un aperçu sur le changement côtier dus aux facteurs physiques, et la capacité du système de subir les pressions socio-économiques très complexes,

Eu égard, ces résultats peuvent être considérés comme un outil d'aide à la gestion de la zone côtière Est algéroise, et comme une étude de cas qui permet aux décideurs de mieux comprendre le mécanisme de réponse de ce système côtier face aux différents forçages de la mer, et par conséquent les finalités de ce chapitre constitue un support d'aide à la prise de décision.

*Conclusion générale
et recommandations*

Conclusion et recommandations

A travers cette étude effectuée sur la côte Est algéroise, comprise entre l'oued Réghaia et cap Matifou (Tamentfoust), nous avons pu répondre aux objectifs suivants :

- Renseigner sur les tendances évolutives du trait de côte dans une échelle de temps de 57ans, en élaborant des mesures sur terrain à l'aide d'un appareil de haute résolution.
- Elaborer, analyser et interpréter un model numérique du fonctionnement hydro-sédimentaire, effectué à l'aide d'un logiciel très performant le « mike21 », et confirmer le régime sédimentaire annuel
- Faire un diagnostic et une évaluation de l'état de vulnérabilité à l'aide d'une méthode de traitement statistique et d'indices côtiers, et apporter un outil d'aide à la gestion des systèmes littoraux.

Dans un soucis de précision et de fiabilité, nous avons utilisé des données actuelles issues des campagnes océanographiques (MEDATLAS) des données météorologiques (ONM, 2014) et des études, les plus récentes possible, en adoptant des méthodes et des techniques pertinentes. En effet nous avons disposé d'instruments de mesure de haute précision, mis à notre disposition par l'Agence de Promotion et de Protection du Littoral de la wilaya d'Alger (APPL), avec laquelle nous avons pu élaborer des suivis du trait de côte par le biais d'un instrument topographique d'une résolution centimétrique, le DGPS, durant deux années 2015 et 2016, ce qui fait l'originalité de ce travail de fin d'étude

- L'évolution cinématique de la ligne de rivage

L'étude des variations de la ligne de rivage a révélé des taux nets d'évolution fluctuants d'un site à un autre, avec une tendance à l'érosion généralisée sur la totalité de la côte étudiée. Les taux moyens annuels enregistrés sur une période de 57ans varient entre -0.6 m/an et -1.8 m/an selon les secteurs, cette étude diachronique a montré d'une part une érosion quasi-générale qui témoigne d'un transport sédimentaire crosse-shore et d'autre part, une juxtaposition entre des secteurs en forte érosion et ceux en recul sur des petites distances, preuve des transferts sédimentaires qui s'opèrent parallèlement à la côte à l'intérieur des cellules hydro-sédimentaires.

Deux causes probables qui ont joué un rôle ensemble pour provoquer une érosion généralisée le long de la côte étudiée, la cause d'ordre naturel est due aux effets répétés et cumulés des tempêtes, et les très faibles apports de l'oued Réghaia, tandis que la cause anthropique est liée essentiellement à la forte urbanisation observée le long de la côte, ainsi que les extractions du sable qui a été même remarqué durant nos sorties sur terrain.

- Le fonctionnement hydro-sédimentaire

Conclusion et recommandations

Les constatations qui ont été faites lors de notre suivi de à la ligne du rivage ont été confirmées par le model numérique effectué à l'aide du système MIKE-21[®] qui d'ailleurs nous a permis de modéliser les champs des courants, les plans de vagues et du transport sédimentaire, en se basant sur quatre directions principales de la houle, dont la N45°, qui est la plus défavorable selon les séries statistiques de la campagne MEDATLAS, de ce fait nous avons détailler les paramètres de ce secteur afin d'avoir les tendances extrêmes ; ce qui a révélé que la direction nord-est est la plus dominante, avec un sens de transit est-ouest, et un débit sédimentaire très important.

- Evaluation de l'état de la vulnérabilité de la zone Est algéroise

Afin de donner une évaluation finale et un élément qui aide à la compréhension de l'état globale de la vulnérabilité de notre zone d'étude, nous avons choisi une méthode de calcul d'indice de vulnérabilité côtière, dans son volet qui traite l'aspect physique dû aux forçages de la mer ainsi que l'aspect socioéconomique.

La zone Est algéroise est soumise à des agents naturels et des caractéristiques côtières qui la rendent vulnérable avec des fluctuations d'intensité

- Un fort degré de vulnérabilité liée aux facteurs physiques est observée au niveau des secteurs : Sercouf-DécaplageElkadous, et Kaf el Arar
- Une moyenne intensité au niveau de toute la zone de Tamaris à Zerzouria, ainsi qu'au niveau de la partie ouest de la plage Réghaia
- Tandis qu'une faible intensité est marquée au niveau de la côte ouest (El Marsa)

le volet socio-économique à apporter des éléments de réponse, du point de vu « intensité de la vulnérabilité ». Nous remarquons que les zones Ouest qui sont marquées par un faible degré par rapport aux facteurs physiques ont, par contre, un très fort degré de vulnérabilité par rapport aux facteurs socio-économiques, cela révèle que la gestion des espaces côtiers ne peut pas se faire uniquement en se basant sur un seul type de facteurs, mais plutôt, sur l'intégrité de tous les facteurs intervenants dans l'évolution dynamique d'une zone assez vulnérable par nature comme la zone côtière

Références bibliographique

BOUAKLINE, S., CHERBIL, F. (2006). *Evolution des plages de la côte Est-algéroise entre Ain Taya et Boumerdes.* Mémoire d'ingénieur. Géomorphologie marine. Alger : USTHB, 98 p.

BOUAKLINE, S. (2009). *Variation historique de la ligne de rivage et érosion cotière le long de la côte Est-algéroise.* Mémoire de magister. Géomorphologie marine. Alger : USTHB, 180 p.

BOUHAMADOUCHE, M. (1993). *Sédimentologie du plateau continentale Est-algérois (Boumerdes-Boudouaou el Bahri) : morphologie, minéralogie, mécanisme hydrosédimentaire, érosion et protection du littoral.* Thèse de doctorat. Géologie marine. Alger : USTHB, 230 p.

CAIRE, A. (1995). *The central mediterranean mountain chains in the Alpine orogenic environment, in the ocean basins and margins.* New York : AMEWH. 256 p.

CETMEF (2009). *Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux. France métropolitaine. environnement, littoral et cours d'eau : Rapport d'activité.* Document non publié. Paris : Centre d'études techniques maritimes et fluviales.

CHALLAL, F., YAHIAOUI, S. (2005). *Contribution à l'analyse de durabilité d'une zone humide côtière (la cas du lac de Réghaia).* Mémoire d'ingénieur. Alger : ENSSMAL, 77p.

COSTA, S. (2015). *Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral.* Thèse de doctorat. France : Université de Caen, 370 p.

DAUPHINE, A. (2001). *Risques et catastrophes.* Paris : Armand Colin. 288 p.

ELIZABETH, H., BOAK, L. (2005). *Shoreline definition and detection..* New South Wales : Manly Vale. 306 p.

GORNITZ, V. (1991). *Global coastal hazards from future sea level rise.* New York : Université de Columbia. 360 p.

Gualdi, S. (2013). *The CIRCE simulations regional climate change projection with realistic representation of the Mediterranean sea: Rapport d'activité.* Document non publié. Italie : Meteorol.

GIEC. (2015). *Rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat: Rapport d'activité.* Document non publié. Suisse : PNUE.

Références bibliographique

JOUZEL, J. (2012). *Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côte française* : Rapport d'activité. Document non publié. Paris : BRGM et Météo France.

KHALFANI, D. (2014). *Etude Hydro-sédimentaire à l'avant côte de Cap Djinet* Mémoire de magister. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, 260 p.

LARID, M. (2008). *La zone côtière humide de Réghaia dans le littoral Est-algérois (Algérie) : contribution méthodologique à son plan de gestion..* Paris : CyberGeo programme européen de la géographie.

LEM. (2006). *Etude de délimitation d'une zone d'extraction de sable zone Est-algéroise* : Rapport d'activité. Document non publié. Alger : Laboratoire des études maritimes.

LEONE, F., VINET, F.(2007). *La vulnérabilité, un concept fondamental au coeur des méthodes d'évaluation des risques.* Montpellier : Martinière groupe 253 p.

MARC, R. (2016). *Étude des risques côtiers sous l'angle de la géomatique* : Rapport d'activité. Document non publié. Paris : Université de Champ-sur-Marne.

MCLAUGHLIN, S. , COOPER, A. (2010). *A multi-scal coastal vulnerability index: a tool for coastal managers.* Belfast : Université d'Ulster p. 233-248.

MEDDTL (2010). *La gestion du trait de côte* : Rapport d'activité. Document non publié. Versailles : Minister du transport et du logement et ministere de l'écologie du développement durable.

MELLET, C., MICHOT, A. (2012). *Synthese de référence des technique du suivi du trait de cote* : Rapport d'activité. Document non publié. France : Bureau des recherches géologiques et minières (BRGM).

MEZHOUD, A. (2011). *Contribution à l'analyse de durabilité du domaine littoral (loi 02-02) inclus dans le projet de la zone d'expansion touristique de Ain Chorb - willaya d'Alger.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, 180 p.

OTMANI, H. (2014). *Impact des infrastructures maritimes sur le littoral.* Mémoire de magister. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, 128 p.

PASKOFF, R., CLUS-AUBY, C. (2007). *L'érosion des plages, les causes, les remèdes.* Paris : Groupe albin michel. 184 p.

Références bibliographique

PILKEY, V. (2014). *Retreat from a Rising Sea: hard choices in an age of climate change.*

Thèse de doctorat. New York.: Université de Columbia, 232 p.

PLANTON, P. (2012). *Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes méditerranéenne* : Rapport d'activité. Document non publié. Paris : Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement.

POC. (2000). *GPS and DGPS made easy* : Rapport d'activité. Document non publié. New York : Atlantas topgraphy.

RAMEIRI, O. (2011). *Method for assessing coastal vulnerability to climate change:* Rapport d'activité. Document non publié. Irlande : European envirenement agency.

SALOMON, J. (2008). *Géomorphologie sous-marine et littorale.* Paris. Orchedy. 104 p.

SHOM (1992). *Trait de côte, descriptif technique* : Rapport d'activité. Document non publié. Paris : Service hydrographique d'océan de la marine et institut géographique national.

Etude et évaluation de l'état de vulnérabilité du système côtier de la zone Est-algéroise

Résumé :

L'érosion du littoral, ainsi que les risques de submersion des côtes, constituent un sujet de préoccupation de plus en plus prégnant pour la zone Est algéroise, compte-tenu de l'augmentation des enjeux dans cette zone, qui est soumise à des aléas naturels récurrents, il convient, d'appréhender trois approches d'étude, premièrement, il est nécessaire de prévoir l'état de la vulnérabilité lié à la mobilité du trait de côte, à différentes échelles spatio-temporelles, deuxièmement, une approche de modélisation est recommandée en élaborant un modèle numérique du climat hydro-sédimentaire qui domine la zone, pour arriver à la démarche géomatique de synthétise, en évaluant l'état de la vulnérabilité de la zone d'étude, par rapport aux facteurs physiques et socioéconomiques par un outil de calcul d'indice de vulnérabilité côtière, dans un but de fournir des éléments de réponse et des outils d'aide à la gestion

Mots clés : érosion, Système d'information géographique (SIG), base de données, vulnérabilité, CVI, modélisation numérique, DGPS, Trait de côte, cartographie, Hydro-sédimentologie,

Absract:

Coastal erosion and the risk of flooding of the coasts , are a concern more and more significant for the Algerian east zone , given the increasing challenges in this area, which is subject to uncertainty recurrent natural , it is appropriate to apprehend three approaches to study , first, it is necessary to provide the status of the vulnerability related to mobility of the coastline at different spatial and temporal scales , secondly, a modeling approach recommended developing a digital model of the hydro-sedimentary climate that dominates the area, to get to the geomatics approach to synthesizing , evaluating the state of vulnerability of the study area , compared to the physical and socioeconomic factors by tool calculates coastal vulnerability index , in order to provide answers and management support tools

Keywords: erosion, Geographic Information System (GIS) database , vulnerability , CVI , numerical modeling, DGPS , Coastline , mapping , Hydro- sedimentology

حساسية السواحل و خطر ارتفاع منسوب البحر، يعد مصدر قلق بالنسبة لمنطقة الشرق الجزائري، بالنظر إلى التحديات المتزايدة ، لغرض دراسة هشاشة وحساسية هذا الساحل ، من المناسب دراسة الوضع وفق ثلاثة مناهج ، اولا من الضروري دراسة حالة المتعلقة بالخط الساحل على مستويات مكانية وزمانية مختلفة، ثانيا، تطوير نموذج رقمي ، للوصول الى تقييم حالة حساسية، مقارنة مع العوامل المادية والاجتماعية والاقتصادية بحساب مؤشر الضعف الساحلي، من أجل تقديم إجابات لدعم اتخاذ القرار الإداري كلمات الدالة؛ حساسة الساحل ، انجراف ، تاكل الصخور ، نظام المعلوماتية الجغرافية،خط الساحل، نمذجة الرقمية، خرنط